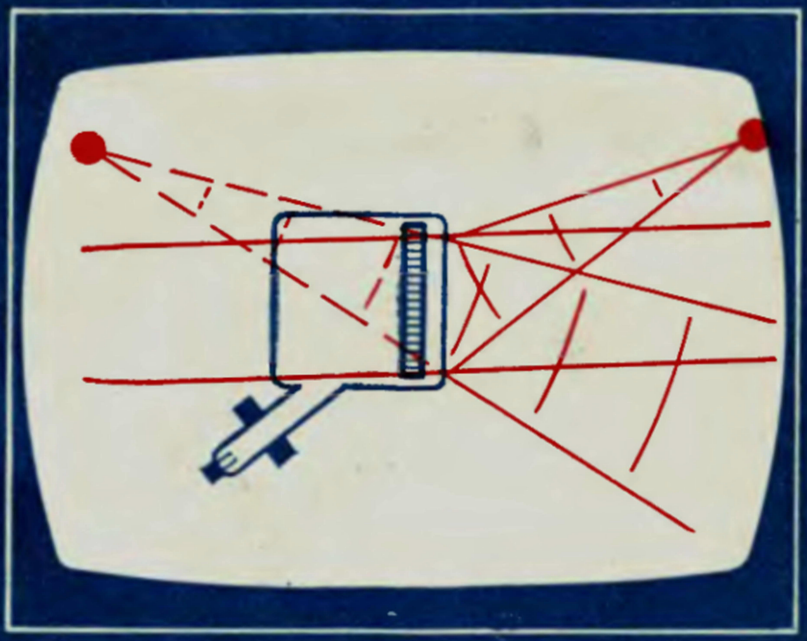
П. М. КОПЫЛОВ, А. Н. ТАЧКОВ

ТЕЛЕВИДЕНИЕ И ГОЛОГРАФИЯ



П. М. КОПЫЛОВ, А. Н. ТАЧКОВ

ТЕЛЕВИДЕНИЕ И ГОЛОГРАФИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ»
МОСКВА 1976

6Ф2.19
К55
УДК 621.397+778.38

Копылов П. М. и Тачков А. Н.

К55 Телевидение и голография. М., «Связь», 1976.

168 с. с ил.

В книге рассматриваются свойства голограмм и особенности их получения. Оценивается информационная емкость оптических и телевизионных изображений и голограмм и описываются некоторые методы сокращения голографической информации Рассматриваются общие принципы построения голографических телевизионных систем и возможности реализации их отдельных звеньев: анализирующего устройства, канала связи, приемного устройства Дается обзор способов построения многоракурсных телевизионных систем и анализируется возможность использования для селекции ракурсов голографических методов

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области голографии и телевидения и смежных отраслях науки и техники

К $\frac{30404—108}{045(01)—76}$ 30—76 6Ф2.19

Павел Максимович Копылов
Анатолий Николаевич Тачков

ТЕЛЕВИДЕНИЕ И ГОЛОГРАФИЯ

Редактор В. А Лазарева
Художник А. Е. Чучканов
Технический редактор Г. И Колосова
Корректор Т. А Васильева

Сдано в набор 28/V 1976 г Подп. в печ. 22/VII 1976 г.
Т-12564 Формат 60×90/16 Бумага писч. № 2 10,5 усл.-печ л. 12,02 уч.-изд л.
Тираж 10 000 экз Изд № 16591 Зак № 143 Цена 72 коп.
Издательство «Связь». Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул Кирова, д 40

© Издательство «Связь», 1976 г.

Оглавление

Стр.

Введение 3

1. Некоторые вопросы получения голограмм

1.1. Источники когерентного света — лазеры 5
Физические принципы работы лазеров 5
Твердотельный лазер 9
Газовый лазер 11
Полупроводниковый лазер 12
Временная и пространственная когерентности 14
Перспективы применения лазеров в приемных телевизионных устройствах 16
1.2. Получение голограмм и их свойства 20
Запись и восстановление волнового фронта 20
Свойства плоских голограмм 25
Свойства трехмерных голограмм 29
Материалы для регистрации голограмм 31
Установка для получения голограмм 32

2. Общие вопросы образования изображений

2.1. Формирование оптических и телевизионных изображений . . . 36
Основные особенности образования оптических изображений . . 36
Телевизионное изображение 39
2.2. Голографическое изображение 42
2.3. Пути сокращения голографической информации 49
Способ дискретного отбора пространственных частот 50
Использование рассеивающей среды 53

3. Принципы голографического телевидения

3.1. Общие вопросы построения голографических телевизионных систем . 56
3.2. Требования к анализирующим устройствам голографических телевизионных систем 59
3.3. Передача голограмм по линиям связи 62
Возможности сокращения полосы частот канала связи при передаче голограмм 62
Влияние характеристики передачи телевизионной системы на воспроизведение голографических изображений 64
Экспериментальные результаты передачи голограмм по каналам связи 70
3.4. Воспроизведение голограмм с помощью телевидения 76
Возможность использования современных телевизионных систем для воспроизведения голографических изображений 76
Возможность использования фотохромных материалов 84
Общие вопросы построения приемных экранов голографических телевизионных систем 89
Воспроизведение изображений с синтезированных голограмм . . 93

4. Стереотелевидение и голография

4.1. Общие принципы построения многоракурсных телевизионных систем 103
4.2. Методы пространственной селекции ракурсов 108
Интегральная фотография и голография 109
Вертикальный линзовый растр 115
Голографический растр 120
Голографический экран 125
Просветный линзовый экран 132
Селектор типа «бегущая щель» 137
Другие методы селекции изображений 142
4.3. Многоракурсные системы и стереотелевидение 144
4.4. Особенности воспроизведения пространственных изображений . . 152
Угловая плотность повторения ракурсов 153
Искажения воспроизводимого пространства 156
Список литературы 163

Введение

Телевидение — это наука о передаче зрительной информации средствами электрической связи и ее воспроизведении на экранах телевизоров. Телевизионная наука и техника непрерывно совершенствуются и развиваются. Развитие это происходит от простого к сложному по пути более достоверного отображения передаваемой информации. В черно-белом телевидении одной из основных задач является сохранение яркостных соотношений между элементами; в цветном телевидении, кроме того, необходимо точно, без искажений, передать сотни цветных оттенков объекта. В настоящее время имеется ясно выраженная тенденция перехода от черно-белого телевидения к цветному. Воспроизведение изображений в красках значительно увеличит их тождественность передаваемым оригиналам, что важно не только в телевизионном вещании, но также в научных исследованиях и освоении космоса.

Следующим этапом в развитии телевидения будет реализация стереоцветного телевидения, которое предоставит телезрителю возможность наблюдать многоцветные и объемные (трехмерные) изображения предметов и ощущать их взаимное расположение в пространстве. При наблюдении объектов, где присутствие человека невозможно или ограничено (поверхности планет, тяжелые условия промышленного производства и др.), стереоцветное телевидение явится мощным инструментом изучения трехмерных сред и управления протекающими в них процессами. Стереоскопические системы, в свою очередь, явятся базой для возникновения многоракурсных телевизионных систем, дающих возможность плавного бокового обзора (оглядывания) воспроизводимых изображений. Объемное изображение можно будет наблюдать без специальных очков с разных ракурсов, смещаясь относительно экрана внутри большой зоны пространства без потери стереоэффекта. При этом наблюдатель увидит некоторые предметы или их части, ранее заслоненные другими.

Голография открывает новые пути построения систем объемного телевидения. При использовании голографических методов кодирования и декодирования передаваемых сообщений эффект оглядывания станет плавным, не скачкообразным, а воспроизводимое изображение — точной оптической копией объекта. Верность пе-

редачи яркостных, цветовых и пространственных параметров деталей объекта здесь будет наивысшей, поэтому можно предполагать, что будущее телевидения — это голографическое телевидение. Однако при реализации голографических телевизионных систем возникает много технических трудностей, связанных с большой информационной емкостью голограмм и высокой удельной плотностью информации. Поэтому вопрос о путях построения голографических телевизионных систем до сих пор еще не решен.

В книге кратко рассмотрены процессы записи и воспроизведения голограмм, принципы построения голографических телевизионных систем, особенности многоракурсных систем, а также отражен практический опыт Ленинградского электротехнического института связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича в области получения голограмм, передачи их по линиям связи и частичном использовании голографических методов в телевидении.

Введение, гл. 1 и 4 написаны П. М. Копыловым, гл. 2 и 3 — А. Н. Тачковым. Книга будет полезна специалистам и студентам для совершенствования знаний в области объемного телевидения и ознакомления с особенностями построения голографических телевизионных систем и частичного использования голографических методов в многоракурсных телевизионных системах. Авторы надеются, что изложенные в этой книге идеи и гипотезы в некоторой степени будут стимулировать дальнейшие исследования на стыке двух интереснейших наук — телевидения и голографии.

Авторы благодарят члена-корреспондента АН СССР, лауреата Ленинской премии Ю. Н. Денисюка за обсуждение плана-проспекта книги, начальника лаб. В. Н. Смирнова и ст. науч. сотрудника МНИТИ С. Е. Андреева за полезные критические замечания при рецензировании рукописи, способствовавшие ее улучшению.

Отзывы и пожелания следует направлять в издательство «Связь» по адресу: 101000 Москва, Чистопрудный бульвар, д. 2.

1

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГОЛОГРАММ

1.1. Источники когерентного света — лазеры

Физические принципы работы лазеров

Голографические методы основаны на использовании явления интерференции световых волн. Интерферировать между собой могут только когерентные волны. Источниками таких волн являются лазеры, или оптические квантовые генераторы (ОКГ), которые поэтому являются неотъемлемой частью любой голографической схемы.

Принцип работы лазера основан на излучении вещества при вынужденном (индуцированном) переходе его атомов и молекул с одного уровня энергии на другой [1.1—1.5]. Известно, что электроны, а следовательно, и атомы в целом, могут иметь только определенные дискретные энергетические уровни (рис. 1.1). Нижний наименьший уровень энергии ε_0 называется основным, остальные — ε_n с более высокой энергией называются возбужденными. При переходе электрона с одного уровня энергии на другой происходит поглощение или излучение определенного количества энергии — кванта или фотона $h\nu$:

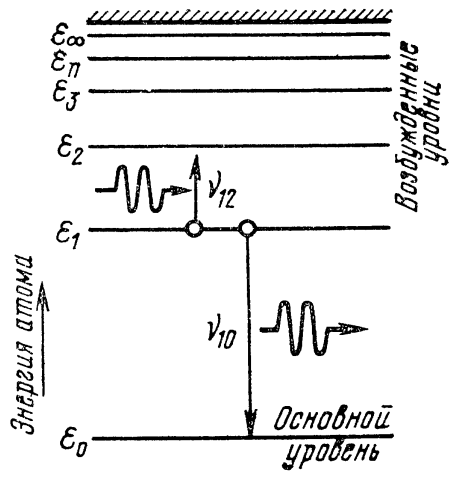


Рис. 1.1. Энергетические уровни атома и квантовые переходы между ними

$$h\nu = \varepsilon_m - \varepsilon_n, \tag{1.1}$$

где ε_m — конечный энергетический уровень после перехода; ε_n — начальный уровень; $h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ эрг·с — постоянная Планка; ν — частота излученной или поглощенной электромагнитной волны.

Атом, как и любая другая система, всегда стремится принять состояние с наименьшей энергией. Поэтому его переход с нижнего энергетического уровня на верхний всегда происходит только под действием внешних сил, например при повышении температуры или поглощении фотона с электромагнитной энергией, равной раз-

ности между уровнями перехода. Переход с верхних уровней на нижние более «легок» и может происходить как самопроизвольно (спонтанное излучение), так и в результате резонансного захвата под действием внешнего излучения (вынужденное, или индуцированное излучение). Переход сверху вниз всегда сопровождается излучением одного фотона $h\nu_{mn}$ с частотой, определяемой разностью энергий между уровнями перехода $\delta\varepsilon$:

$$\nu_{mn} = \frac{\delta\varepsilon}{h} = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_n}{h}.$$

Разность энергий между нижними энергетическими уровнями всегда больше разности между верхними уровнями и соответствует поэтому более коротковолновому, рентгеновскому излучению. Видимый свет соответствует переходам между верхними валентными электронами.

Спонтанное (некогерентное) излучение отличается отсутствием жесткой закономерности и согласования переходов как по уровням, так и во времени. Примером такого некогерентного излучения являются лампы накаливания и газоразрядные лампы. Для усиления и генерации света в лазерах используется вынужденное излучение. Спектральная линия излучения атома никогда не бывает бесконечно узкой — всегда наблюдается определенная ширина излучаемых частот $\Delta\nu$ (рис. 1.2.). Уширение линии излучения вы-

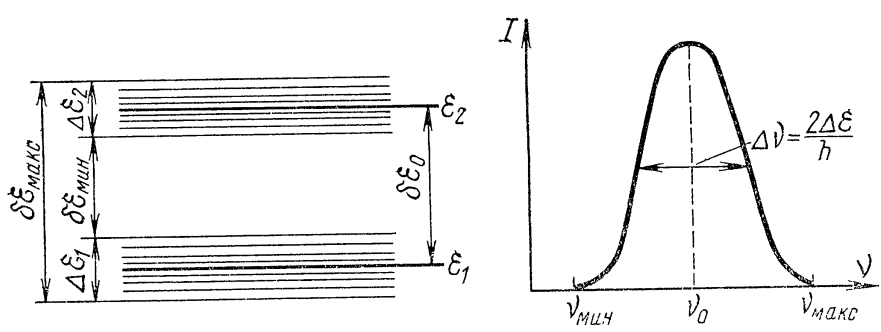


Рис. 1.2. Ширина спектральной линии излучения

зывается столкновениями частиц друг с другом, эффектом Допплера вследствие их теплового движения и другими причинами. Центральной частоте излучения соответствуют наиболее вероятные переходы между уровнями с разностью энергий $\delta\varepsilon_0$, крайним частотам — менее вероятные и поэтому имеющие меньшую интенсивность излучения (или поглощения) I переходы между наиболее удаленными и наиболее близкими уровнями с разностью энергий $\delta\varepsilon_{макс}$ и $\delta\varepsilon_{мин}$:

$$\nu_0 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{h} = \frac{\delta\varepsilon_0}{h}; \quad \nu_{макс} = \frac{\delta\varepsilon_{макс}}{h}; \quad \nu_{мин} = \delta\varepsilon_{мин}/h.$$

Рассмотрим условия, необходимые для создания источника когерентного света. Чтобы вещество стало усиливающим (активным), на верхних уровнях должно находиться больше атомов, чем

на нижних. Это состояние называется инверсией населенностей. Так как в естественных условиях нижние энергетические уровни населены более плотно, чем верхние, то оно должно поддерживаться искусственно. Инверсия населенностей может осуществляться путем нарушения теплового равновесия с помощью мощного вспомогательного излучения (накачки), электрического разряда в газе, инжекции (вспрыскивания) извне электронов и дырок в полупроводнике или его бомбардировки пучком электронов и других методов. Если на вещество, находящееся в инверсном состоянии, направить излучение, частота которого соответствует частоте квантового перехода атомов

$$\nu = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)/h,$$

то прохождение световой волны через такое вещество будет сопровождаться ее усилением, так как количество переходов атомов с уровня энергии ε_2 на уровень энергии ε_1, вызывающих появление новых фотонов, будет превосходить число актов поглощения $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_2$. Происходит лавинное нарастание числа фотонов в веществе. Усиление электромагнитных колебаний за счет индуцированного характера излучения является когерентным, т. е. дополнительно испущенные кванты полностью тождественны исходным. Другими словами, вынужденное излучение сохраняет частоту, фазу, направление распространения и поляризацию исходной световой волны, положившей начало лавинному процессу усиления света [1.1., 1.2, 1.12].

Чтобы усилитель электромагнитных колебаний мог стать генератором, необходима положительная обратная связь. В лазерах она создается путем помещения активного вещества между двумя параллельными зеркалами, что обеспечивает многократный пробег волны внутри такого открытого резонатора (резонатора Фабри-Перо). Этим обеспечивается большая величина регенеративного оптического усиления для света, распространяющегося вдоль оси резонатора, без значительного увеличения протяженности активной среды. Одно из зеркал делается полупрозрачным для вывода части излучения наружу.

Еще одно условие возникновения генерации света заключается в том, что лазерное усиление должно превышать суммарные потери в активном веществе (например, рассеивание электромагнитной энергии на неоднородностях кристаллов) и зеркалах резонатора (коэффициент отражения меньше 100% и потери на излучение — вывод части света наружу через полупрозрачное зеркало).

Таким образом, для работы лазера необходимо: рабочее вещество с инверсной населенностью; зеркала для осуществления обратной связи; достаточная величина квантового усиления вещества.

Формирование лазерного пучка происходит следующим образом. В открытом резонаторе лазера образуются стоячие волны. Совпадение фаз падающей и отраженной волн будет только в том

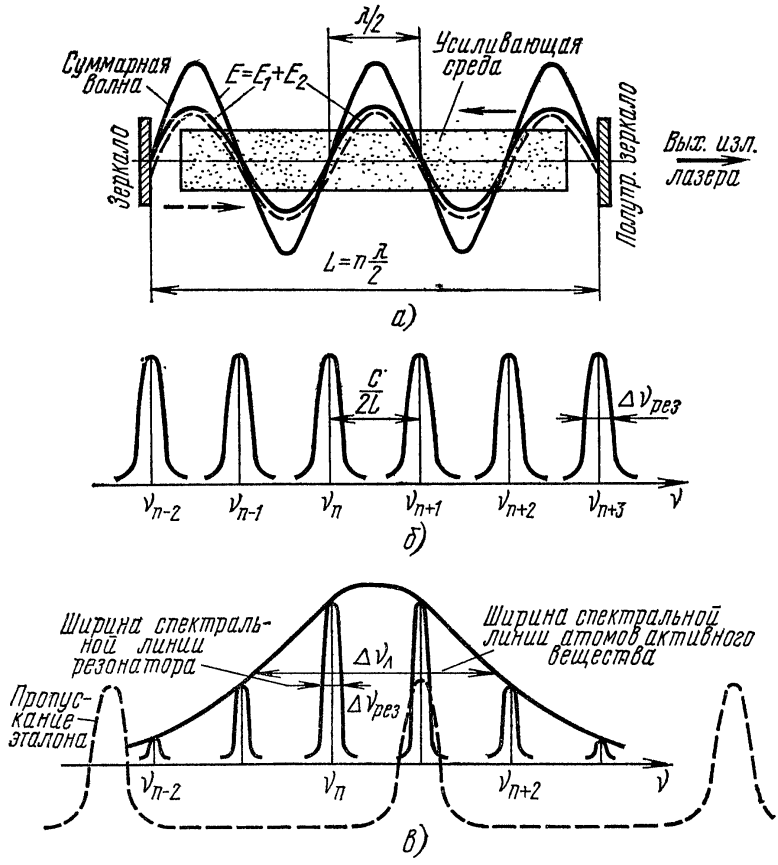


Рис. 1.3. Спектральные линии излучения лазера: *а* — образование стоячих волн в резонаторе; *б* — спектр собственных частот резонатора; *в* — спектр излучения лазера

случае, когда на расстоянии L между зеркалами укладывается целое число полуволн n (рис. 1.3*а*):

$$n = \frac{L}{\lambda_{n/2}} . \qquad (1.2)$$

При несоблюдении этого условия волны будут полностью или частично гасить друг друга. Таким образом, открытый резонатор лазера резонирует на определенных собственных частотах

$$\nu_n = \frac{c}{2L} n,$$

где c – скорость распространения света в активной среде. Из-за потерь в реальных резонаторах условия резонанса выполняются для небольшой полосы $\Delta\nu_{рез}$, вблизи каждой из собственных частот резонатора (рис. 1.3*б*).

Ширина спектральной линии излучения атома активного вещества лазера обычно бывает больше расстояния между собственными частотами резонатора:

$$\Delta\nu_л > \frac{}{2L} . \qquad (1.3)$$

Поэтому в спектр излучения лазера входит, как правило, целый ряд частот ν_n (рис. 1.3*в*), и тем не менее по сравнению с другими источниками света лазеры обладают очень высокой степенью монохроматичности $\nu/\Delta\nu$. Она будет еще выше при условии $\Delta\nu \leqslant c/2L$ (рис. 1.3*в*, пунктир). Излучение в этом случае практически происходит только на одной доминирующей частоте ν_0 (на одной продольной моде резонатора). Такой режим работы лазера называют одночастотным. Он достигается введением в резонатор селективного элемента (эталона Фабри-Перо), вносящего большие потери для нежелательных продольных мод резонатора [1.3].

Различают еще поперечные моды, отличающиеся между собой распределением электромагнитных полей в плоскости, перпендикулярной оси резонатора. При одномодовом режиме, когда лазер генерирует только одну из них, расходимость лазерного луча минимальна (т. е. луч имеет острую направленность излучения) и определяется соотношением

$$\theta \approx \lambda/d, \qquad (1.4)$$

где d — диаметр торца активного вещества. Селекция поперечных мод обычно достигается введением в резонатор лазера диафрагмы. Мощность излучения при этом несколько снижается [1.4].

В квантовой системе, имеющей только два уровня энергии, увеличение мощности накачки приводит к выравниванию населенностей этих уровней (насыщению перехода). При этом вероятности вынужденного испускания и поглощения света атомами активного вещества становятся равными и усиления света не будет. Рабочее вещество лазера должно иметь поэтому три и более уровня энергии. Использовать трехуровневую систему и внешний электромагнитный источник накачки для получения инверсии населенностей предложили в 1954—55 гг. лауреаты Ленинской и Нобелевской премий Н. Г. Басов и А. М. Прохоров (СССР), а также Чарльз Таунс (США).

Твердотельный лазер

В качестве активных элементов в твердотельных лазерах применяются стержни из рубина, стекла с неодимом, кристаллов алюмоиттриевого граната (АИГ) с неодимом [1.1, 1.6] и т. д.

Рубин — это диэлектрический кристалл окиси алюминия Al_2O_3, в котором небольшую часть атомов Al заменяют ионы хрома Cr^{+++}. Энергетический спектр атомов Cr в рубине показан на рис. 1.4*а*. Кроме основного энергетического уровня ε_0, имеются два узких уровня энергии ε_1 и ε_2, переход с которых на уровень энергии ε_0 и обеспечивает генерацию красного света с длиной волны $\lambda \approx 0{,}7$ мкм. Инверсию населенностей на уровнях энергии ε_1 и ε_2 осуществляют путем оптической накачки лампой-вспышкой мощностью в несколько сот киловатт. Около 15% этой мощности используется полезно — для перехода атомов Cr с уровня энергии

ε_0 на уровни энергии ε_3 и ε_4. С этих уровней они быстро ($\tau \approx 2 \cdot 10^{-7}$с) переходят на уровни энергии ε_1 и ε_2, где задерживаются относительно долго ($\tau \approx 5 \cdot 10^{-3}$с) и этим создают необходимую для генерации света инверсию населенностей.

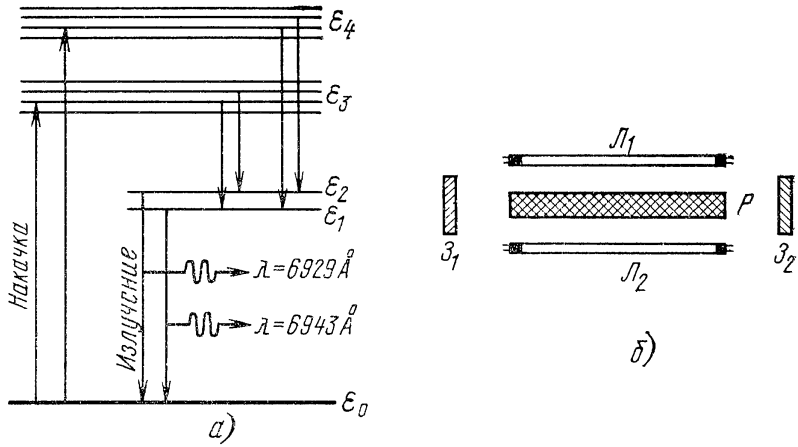


Рис. 14. Энергетический спектр атомов хрома в рубине (*а*) и схематическое изображение рубинового лазера (*б*)

Схематически устройство рубинового лазера показано на рис. 1.4*б*. Рубиновый стержень *Р*, окруженный лампами-вспышками $Л_1$ и $Л_2$, помещают между зеркалом $З_1$ и полупрозрачным зеркалом $З_2$. В реальных конструкциях принимаются меры для концентрации света ламп-вспышек на рубиновом стержне, а также для его охлаждения проточной водой или жидким азотом.

Коэффициент полезного действия твердотельных лазеров не превышает 1—2%. Наиболее распространенный режим работы — импульсный. При длине стержня 20—25 см, диаметре 1,5 см, длительности импульсов когерентного света $\tau \approx 10^{-3}$с и частоте их повторения несколько десятков герц мощность рубинового лазера может достигать десятков киловатт. Если перевести в возбужденное состояние все атомы Cr при выключенной обратной связи, а потом ее включить на очень короткое время ($\tau \approx 10^{-8}$с), то мощность лазерной вспышки повысится до нескольких мегаватт. Периодическое отключение обратной связи в таких лазерах с регулируемой добротностью осуществляется с помощью вращающихся призм, ячеек Керра и Поккельса, эффекта Фарадея и других методов. Например, рубиновый лазер с регулируемой добротностью и длительностью импульса порядка $\tau = 10^{-8}$с использовался в совместном советско-французском эксперименте по лазерной локации специального оптического уголкового светоотражателя, изготовленного французскими специалистами и установленного на советском автоматическом аппарате «Луноход-1», доставленном на Луну 17 ноября 1970 г. автоматической станцией «Луна-17». Этот эксперимент позволил уточнить расстояние от Земли до Луны.

В газовых лазерах [1.1, 1.7] активной средой является газ или смесь газов. Инверсия населенностей осуществляется, в основном, в процессе электрического разряда (газоразрядные лазеры). При этом образуется много свободных электронов, которые сталкиваются с частицами газа и возбуждают их. Плотность газа мала и

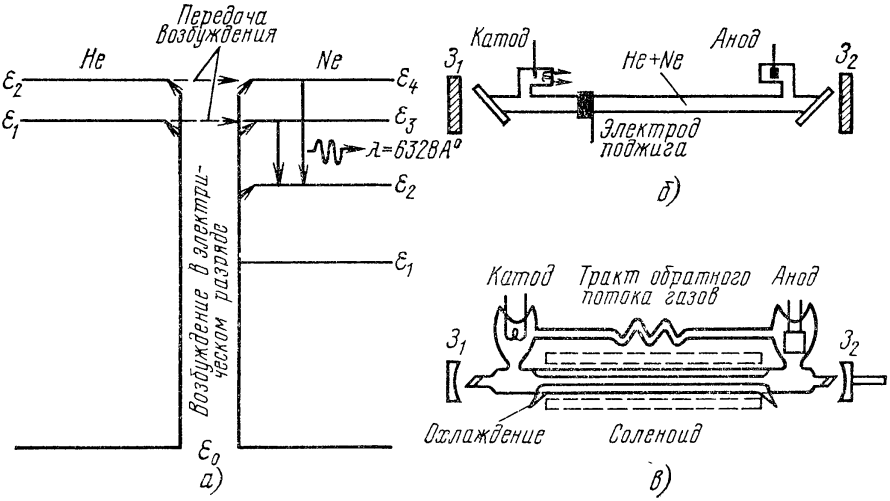


Рис. 1.5. Энергетические уровни гелий-неоновой смеси (*а*) и схематическое изображение гелий-неонового (*б*) и аргонно-ионного (*в*) лазеров

свет в нем практически не рассеивается. Для уменьшения поглощения светового пучка при его многократном пробеге внутри резонатора и его поляризации плоско-параллельные пластинки на торцах газоразрядных трубок (рис. 1.5*б*, *в*) наклоняют под определенным углом (углом Брюстера). Малые потери светового луча позволяют выбрать длину резонатора достаточно большой. При этом легко получить высокую монохроматичность и острую направленность излучения газового лазера, что делает его почти незаменимым элементом голографической установки. Достоинством газового лазера является и то, что он может работать как в импульсном, так и в непрерывном режимах.

Рабочим веществом гелий-неонового лазера являются нейтральные атомы неона Ne. При их возбуждении они переходят с основного энергетического уровня энергии ε_0 на уровни энергии ε_3 и ε_4, на которых время жизни атома относительно велико (рис. 1.5*а*). С другой стороны, уровень энергии ε_2 обладает очень коротким временем жизни, что и определяет возможность создания инверсии населенностей между этими уровнями. Источником дополнительного возбуждения атомов Ne является гелий He. При соударениях возбужденных атомов He с атомами Ne, находящимися в основном состоянии, происходит резонансная передача возбуждения с уровней энергии ε_1 и ε_2 атомов He на уровни энергии ε_3 и ε_4 атомов Ne (энергии этих уровней точно совпадают).

Гелий-неоновый лазер излучает красный свет ($\lambda \approx 0{,}63$ мкм). Его выходная мощность небольшая, порядка 10—100 мВт, однако он имеет широкое применение вследствие простоты конструкции (рис. 1.5*б*), стабильности работы и высокой направленности излучения. Мощности ионных лазеров, в которых излучение происходит в результате перехода между уровнями ионизированых инертных газов (аргон, неон, криптон, ксенон) или ионов фосфора, серы и хлора, составляют десятки ватт в непрерывном режиме и сотни ватт в импульсном режиме. Аргонные лазеры (рис. 1.5*в*) излучают зеленый ($\lambda = 0{,}51$ мкм) и синий ($\lambda = 0{,}49$ мкм) свет, а криптоновые лазеры могут излучать целую гамму длин волн ($\lambda = 0{,}65$; 0,57; 0,52; 0,48 мкм). Коэффициент полезного действия газовых лазеров низок и обычно не превышает 0,01—0,1%. Однако молекулярный лазер на углекислом газе ($\lambda = 10{,}6$ мкм) обладает очень высоким КПД (~ 30—40%) при большой мощности излучения. Поэтому он с успехом применяется для резки и сварки металлов и световой локации.

Полупроводниковый лазер

Под инверсией населенностей в полупроводниках [1.1, 1,8] понимают процесс вырождения электронов и дырок, заключающийся в том, что в нижней части зоны проводимости все уровни будут заняты электронами, а в верхней части валентной зоны — дырками. При этих условиях в определенном интервале частот полупроводник не поглощает свет, а усиливает или генерирует его [1.1]. Инверсия населенностей в полупроводнике может осуществляться путем инжекции электронов и дырок в полупроводник с помощью *p-n* перехода (электроны «впрыскиваются» в зону проводимости, а дырки — в валентную зону), оптической накачки, бомбардировки пучком электронов или ударной ионизации.

Наибольшее распространение получили инжекционные (диодные) лазеры. Работа лазера в непрерывном режиме практически возможна лишь при температурах ниже комнатной; КПД диодных лазеров при 77 К (температура жидкого азота) достигает 30% — это наивысшее значение для всех типов оптических квантовых генераторов. Спектр излучения при использовании различных полупроводниковых кристаллов простирается от 0,65 до 8 мкм. Рабочим веществом является, в основном, кристалл арсенида галлия с *p-n* переходом, который помещается между двумя металлическими (медными или молибденовыми) дисками для подведения к кристаллу электрического тока от источника накачки и для отвода тепла. Излучение наблюдается в плоскости *p-n* перехода со стороны параллельных, тщательно отполированных торцов кристалла.

При электронном возбуждении полупроводника пучок электронов с энергией более 30—40 кэВ и плотностью тока 100—150 А/см^2 направляется на плоскую грань полупроводника. Проникая в глубь кристаллической решетки, электроны пучка большую часть

своей энергии отдают валентным электронам, побуждая их переходить в зону проводимости. Один электрон пучка создает до 10^4 электронов и дырок в полупроводнике, которые располагаются по краям зоны проводимости и валентной зоны (излишек сообщенной им энергии передается кристаллической решетке и выделяется в виде тепла). Таким образом, создается необходимое для генерации света неравновесное распределение по энергиям электронов и дырок. Глубина проникновения электронов пучка в полупроводник невелика и составляет примерно 10 мкм, поэтому поверхность полупроводниковой пленки должна быть тщательно обработана. Коэффициент полезного действия таких лазеров составляет 10—30%, так как с повышением температуры увеличивается пороговая плотность тока накачки, работа в непрерывном режиме здесь также возможна лишь при температуре, значительно ниже комнатной, поэтому требуется активное охлаждение полупроводника. Диапа-

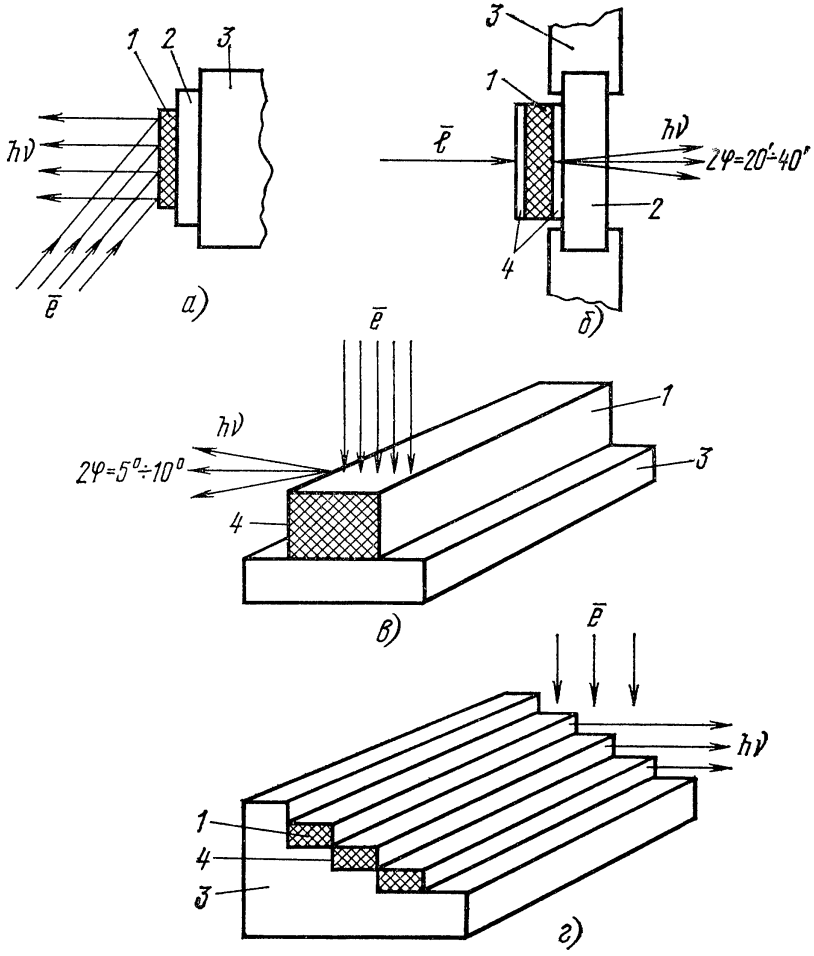


Рис. 1.6. Конструкции полупроводниковых ОКГ с электронным возбуждением типа «излучающих зеркал» (*а*, *б*), строчной мишени (*в*) и многоэлементные системы (*г*):
1 — полупроводниковая пленка; *2* — сапфировая подложка; *3* — хладопровод; *4* — зеркала

зон излучаемых волн составляет 0,3—8 мкм, т. е. охватывает ультрафиолетовую (УФ) и инфракрасную (ИК) области спектра. Излучение лазера происходит в интервале $\Delta\lambda = 10^{-10} \div 10^{-8}$ м.

Перспективными конструкциями полупроводниковых генераторов с электронным возбуждением являются конструкции типа «излучающих зеркал», «строчной мишени» и многоэлементные системы [1.9]. В лазере, использующем конструкцию типа «излучающее зеркало» (рис. 1.6*а*, *б*), свет генерируется с большой поверхности тонкой (30—50 мкм), тщательно отполированной полупроводниковой пленки *1* при ее возбуждении электронным пучком. Пленка наносится на отводящую тепло с помощью хладопровода *3* сапфировую подложку *2*. На подложку и пленку наносятся зеркала *4*, которые образуют резонатор лазера (одно из них, обращенное в сторону излучения, является полупрозрачным). Для предотвращения уменьшения инверсии населенностей при усилении света вдоль пленки вся ее поверхность разбивается на отдельные, оптически изолированные ячейки размерами в несколько сотен микрон.

В конструкции типа «строчная мишень» (рис. 1.6*в*) световое излучение ортогонально электронному пучку. Отшлифованные грани полупроводника, перпендикулярные облучаемой грани, являются зеркалами резонатора. Площадь излучающей поверхности здесь значительно меньше, чем в конструкции типа «излучающее зеркало», поэтому угловая расходимость лазерного пучка больше (5—10° вместо 20—40′). Излучаемый световой поток может быть красного, зеленого или любого другого цвета в зависимости от химического состава мишени. В многоэлементной ступенчатой структуре (рис. 1.6*г*), где подобные «строчки» повторены несколько раз, излучение может иметь заданную и управляемую цветовую гамму.

Временна́я и пространственная когерентности

Когерентностью называется свойство света создавать неподвижную интерференционную картину в большом объеме пространства. Различают временную и пространственную когерентности [1.1, 1.2, 1.10]. Реальные колебания являются немонохроматическими, т. е. состоят из определенного числа составляющих. Тем не менее они сохраняют когерентность и могут интерферировать между собой в течение определенного времени τ, называемого временем когерентности (или продолжительностью цуга), пока разность их фаз $\Delta\varphi$ не станет сравнимой с π. За время τ колебания успеют распространиться на расстояние $l_к = c\tau$ (c — скорость света), называемое длиной когерентности (или длиной цуга). Интерференция может иметь место лишь в том случае, если разность хода взаимодействующих лучей не превышает длины когерентности $l_к$. Чем больше время когерентности τ, тем у́же спектр излучения $\Delta\nu$, т. е. излучение является более монохроматическим:

$$\Delta\nu = \frac{1}{\tau} \tag{1.5}$$

или

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\nu}{\nu}\lambda_0 = \Delta\nu\frac{\lambda_0^2}{c}. \tag{1.6}$$

Монохроматичность лазерного излучения очень высока, хотя и не абсолютна. Полоса частот, занимаемая компонентами лазерного излучения, примерно в 10^5 раз меньше, чем для составляющих белого света.

При известной степени монохроматичности излучения

$$\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_{макс} + \lambda_{мин}}{2\Delta\lambda} \qquad (1.7)$$

всегда можно рассчитывать время когерентности

$$\tau = \frac{1}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_0^2}{c\,\Delta\lambda} = \frac{\lambda_0}{c}\,\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \qquad (1.8)$$

и длину цуга

$$l = c\tau = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} = \lambda_0 \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}, \qquad (1.9)$$

которые полностью определяют временную или хроматическую когерентность.

Гелий-неоновые лазеры имеют большую длину когерентности — от 10—20 см при разрядной трубке 1—2 м до десятков метров при короткой разрядной трубке (ЛГ-56). Длина когерентности рубиновых лазеров обычно не превышает нескольких сантиметров. В табл. 1.1 приведены длины когерентности и другие параметры для некоторых газовых лазеров, применяемых в голографии [1.11].

ТАБЛИЦА 1.1

Тип лазера	Длина волны излучения λ, мкм	Длина когерентности $l_к$, см	Число генерируемых частот N	Мощность лазерного пучка P, мВт	Длина трубки $L_{тр}$, мм	Режим работы
ЛГ-36	0,63	20	13	40 (20)	1200	Многомодовый (одномодовый)
ЛГ-36А	0,63	20	17	80 (40)	1600	То же
ЛГ-38	0,63	20	17	100 (50)	1600	—»—
ЛГ-106	0,5	5	—	$1 \cdot 10^3$	820	Многомодовый
ЛГ-159	0,63	>10 м	1	10	1600	Одночастотный

Термин пространственная когерентность применяют для описания когерентных свойств волны в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения. Так как световая волна никогда не бывает идеально плоской, то для колебаний в двух точках этой плоскости всегда наблюдаются случайные изменения амплитуды и разности фаз, что снижает пространственную когерентность (или направленность) излучения. При удалении этих точек на некоторое расстояние $l'_к$ разность фаз становится сравнимой с π и когерентность колебаний в этих точках исчезает. Лазерное излучение по сравнению с излучением нагретого тела обладает огромной пространственной когерентностью, т. е. случайные изменения фазы в поперечном сечении лазерного пучка у выходного отверстия лазера при одномодовом режиме незначительны. Это объясняется индуцированным характером излучения во всем объеме активного вещества лазера. Процесс многократного (до 10^5 раз в гелий-неоновом

лазере) прохождения света через разрядную трубку лазера эквивалентен удалению на очень большое расстояние (до 100 км) того первого атома, который удачно испустил луч подходящей длины волны и направления [1.2]. Поэтому луч, выходящий из лазера, ведет себя как луч, испускаемый интенсивным и очень маленьким источником света, помещенным в фокусе объектива с большой апертурой.

Степень пространственной когерентности определяется разбросом по направлению излучений, имеющих одну и ту же частоту, т. е. зависит от протяженности реальных источников света. Угол, характеризующий расходимость светового пучка, связан с характерными поперечными размерами прибора d приближенной формулой $\theta=\lambda/d$. Угловая расходимость луча газовых лазеров составляет единицы угловых минут, твердотельных лазеров — десятки угловых минут, полупроводниковых лазеров — несколько градусов.

Произведение $l_к \pi \left(\frac{l'_к}{2}\right)^2$ называют объемом когерентности [1.1]. Это часть пространства, занимаемого волной, в котором волна сохраняет когерентность.

Таким образом, лазеры, в отличие от обычных источников, способны предельно концентрировать энергию электромагнитного излучения в пространстве (высокая направленность лазерного излучения), в частотном интервале (высокая монохроматичность лазерного излучения) и во времени (сверхкороткие импульсы лазерного излучения). Они могут работать в непрерывном и импульсном режимах и в широком диапазоне волн — от волн вакуумного ультрафиолетового до волн субмиллиметрового излучения [1.12].

Перспективы применения лазеров в приемных телевизионных устройствах

В последние годы ведутся теоретические и экспериментальные исследования [1.9, 1.13—1.15] возможности применения лазеров в телевизионных устройствах. Перспектива замены электронно-лучевой трубки лазером, световые лучи которого модулируются видеосигналом и отклоняются по горизонтали и вертикали, таит в себе много явных преимуществ, таких, как: возможность получения больших экранов (десятки квадратных метров); обеспечение повышенной четкости изображения (порядка 1000 и более строк) вследствие малой угловой расходимости лазерного луча (несколько угловых минут для газового лазера); воспроизведение изображений с высокой контрастностью (100:1); получение большой яркости воспроизводимых изображений (порядка 100кд/м^2) с возможностью их наблюдения при дневном освещении.

В настоящее время создание достаточно мощных газовых лазеров непрерывного действия не является проблемой. На всемирной выставке в Осака «Экспо-70» демонстрировалась японская цветная телевизионная установка, использующая для получения изображения на экране размером 3×4 м^2 три газовых (криптоно-

ный и аргоновые) лазера непрерывного действия мощностью 8 Вт каждый. Использовалась механическая развертка светового луча (525 строк, 60 полей в секунду).

Структурная схема цветного лазерного телевизионного приемника (телепроектора) приведена на рис. 1.7 [1.9, 1.13, 1.14]. Модуляция интенсивности световых пучков осуществляется с помощью оптических модуляторов, управляемых

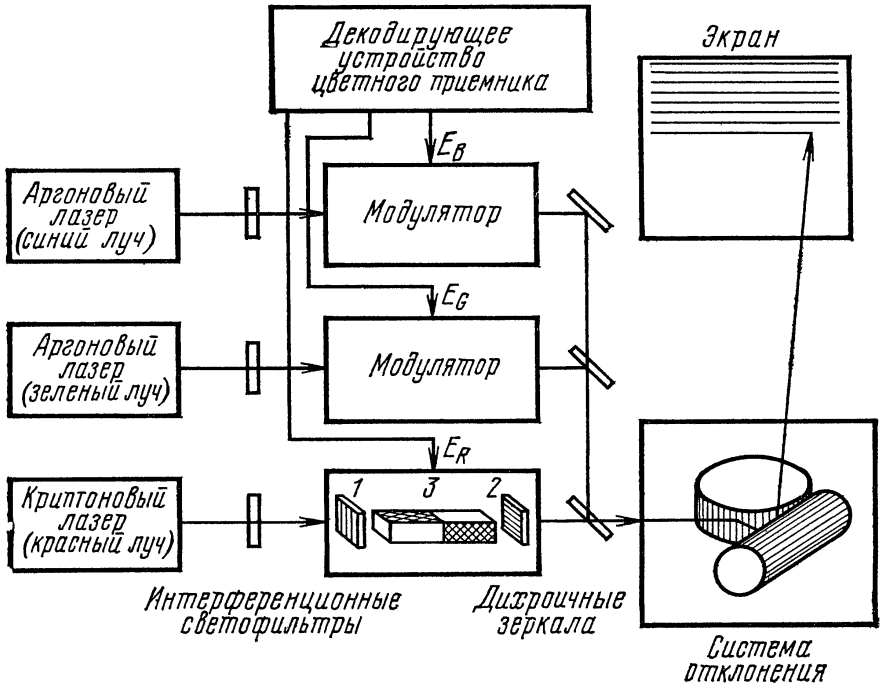


Рис. 1.7. Структурная схема цветного лазерного телепроектора: *1*, *2* — поляризаторы света; *3* — электрооптический кристалл модулятора

сигналами основных цветов E_R, E_G и E_B. Эти сигналы получаются на выходе декодирующего устройства обычного цветного приемника. В качестве источника синего (λ=0,49 мкм) и зеленого (λ=0,51 мкм) света используются два аргоновых лазера, работающих в разных режимах, а красный свет (λ=0,65 мкм) генерирует криптоновый лазер. В оптических модуляторах света чаще всего используют электрооптические эффекты в кристаллах, например в кристалле КДП (дигидрофосфат калия KH_2PO_4). На схеме показаны отдельные элементы такого модулятора. Поляризаторы *1* и *2* на входе и выходе модулятора имеют взаимно перпендикулярные плоскости поляризации, и модулятор в исходном состоянии не пропускает свет. Кристалл *3* начинает поворачивать плоскость поляризации проходящего через него света и модулятор становится прозрачным, если к электродам кристалла, параллельным направлению распространения света, приложить напряжение видеосигнала в несколько тысяч вольт. При использовании двух кристаллов, оптические оси которых взаимно перпендикулярны (см. рис. 1.7), это напряжение снижается до нескольких сот вольт.

Далее с помощью системы дихроичных зеркал три модулированных цветовыми сигналами лазерных луча собираются в один световой пучок, который поступает на систему горизонтального и вертикального отклонения. Наиболее простыми являются механические системы отклонения. Например, в японской лазерной телевизионной установке для этой цели используются два вращающих-

ся зеркальных барабана. Барабан горизонтальной развертки состоит из 16 зеркал и имеет частоту вращения 60 тысяч об/мин., барабан вертикальной развертки — 24 зеркала, частота вращения 150 об/мин. Другой вариант механической развертки: кольцевая развертка светового луча с последующим ее преобразованием (с помощью волоконной оптики) в линейную горизонтальную развертку и вертикальное сканирование с помощью колеблющегося зеркальца гальванометра. Однако большим препятствием в использовании этих методов является инерционность механических элементов и их быстрая изнашиваемость. С этой точки зрения более предпочтительны принципиально возможные немеханические виды разверток, например электроакустические, или «дефлекторы», с использованием электрооптического эффекта в кристаллах [1.13].

После системы отклонения отраженный от зеркал световой луч непосредственно или с помощью фокусирующего объектива воспроизводит на большом диффузно-рассеивающем экране цветное телевизионное изображение с достаточной яркостью и повышенной четкостью.

Что касается недостатков телепроекторов с использованием газовых лазеров, то они в основном связаны с трудностями технической реализации устройств модуляции и отклонения лазерного луча, небольшим сроком службы (500—1000 часов) и низким КПД лазеров, не превышающим 0,01—0,1%. Поэтому лазерный телепроектор с экраном порядка 10 м² будет потреблять от сети около 0,1 МВт электроэнергии [1.9].

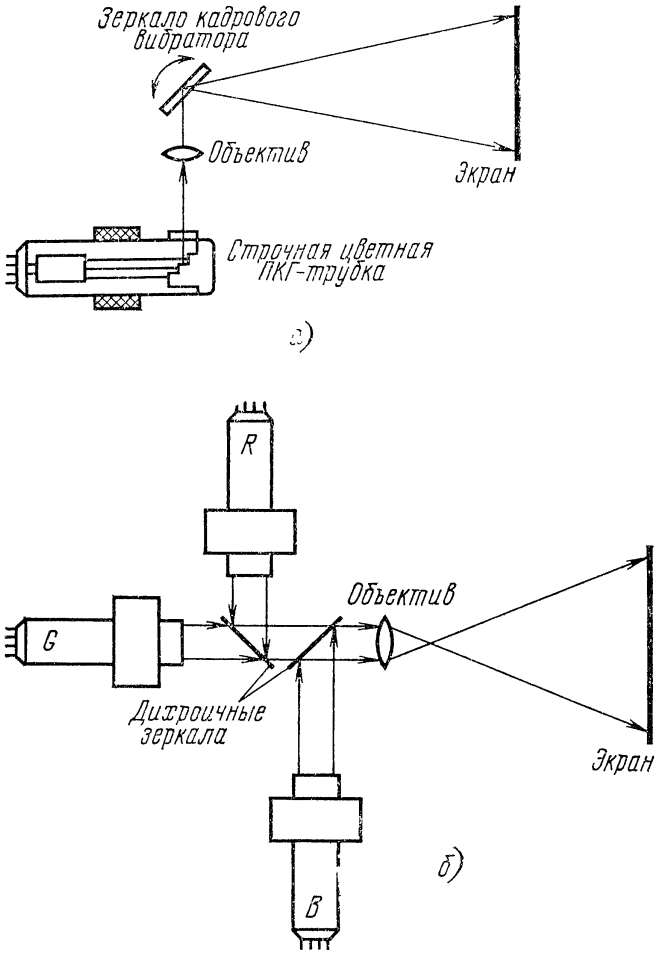


Рис. 1.8. Структурные схемы цветных телепроекторов со строчной (*а*) и пленочными (*б*) ПКГ-трубками

Эти трудности можно преодолеть, если в телепроекторе использовать электронно-лучевую трубку (ЭЛТ) с лазерным экраном [1.15]. Тогда оптико-механическая развертка светового луча будет заменена обычным электронным сканированием электронного пучка, а высокий КПД полупроводниковых квантовых генераторов (ПКГ-трубок) значительно снизит потребление энергии лазерной воспроизводящей системой и увеличит возможности ее практического применения.

На рис. 1.8*а* показана схема цветного телепроектора со строчной ПКГ-трубкой [1.9]. В лазерной трубке встроены три «строчные мишени» — *R*, *G* и *B*, излучение с которых с помощью объектива проецируется на зеркало кадрового вибратора и далее на экран относительно небольшого размера (1—3 м²). Большой экран до 200 м² может иметь цветной телепроектор с тремя ПКГ-трубками с пленочной мишенью «излучающее зеркало» (рис. 1.8*б*) [1.9]. В этом случае может быть и одна ПКГ-трубка, если все три «излучающих зеркала» разместить на общей подложке (рис. 1.9*а*), что сделать нетрудно, учитывая их малые размеры (около 1 см²) [1.15]. Так как лазеры излучают поляризованный свет, то двух таких ПКГ-трубок будет достаточно для построения цветной стереотелевизионной системы (рис. 1.9*б*), если перед одной трубкой поместить вращатель плоскости поляризации (например исландский шпат) [1.15].

Реальная конструкция первого образца ЭЛТ с лазерным экраном, созданного в физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР в лаборатории, руководимой лауреатом Ленинской и Нобелевской премий академиком Н. Г. Басовым, показана на рис. 1.10 [1.15]. Катод является точечным источником электронов, ускоряемых в промежутке между катодом и анодом. На анод

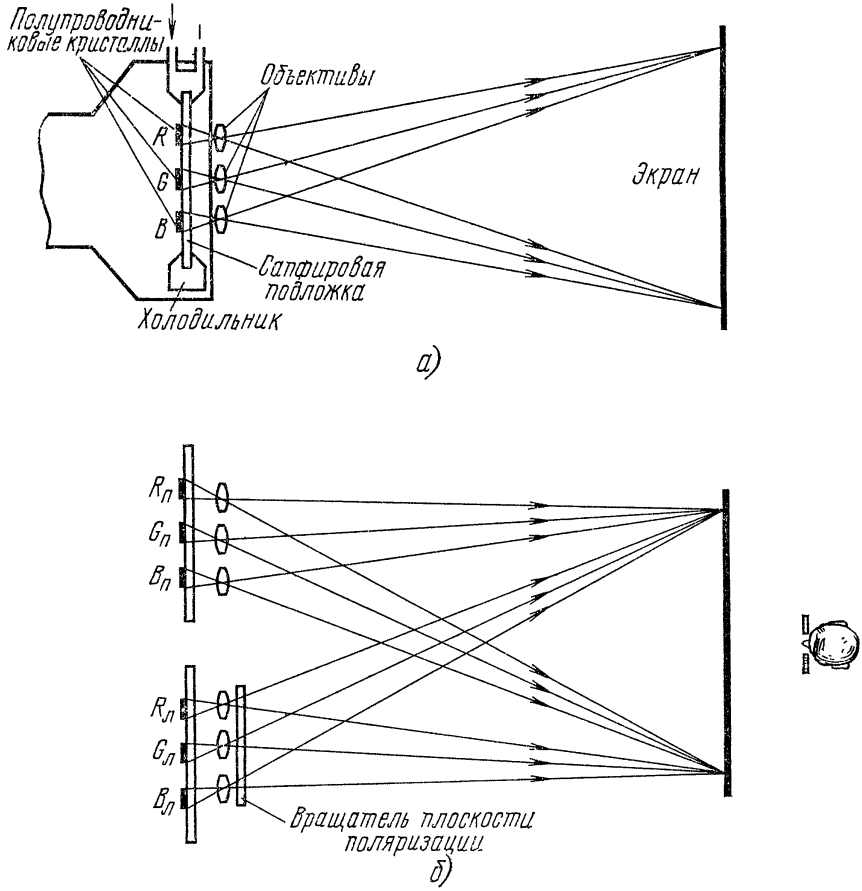


Рис. 1.9. Использование ПКГ-трубок в цветном (а) и стереоцветном (б) телевидении

через высоковольтный ввод подается напряжение $E_a = 30 \div 100$ кВ. Одна пластина электростатического модулятора заземлена, а на другую подано напряжение так, чтобы электронный пучок был отклонен и не проходил через щелевую диафрагму. При подаче на пластины видеосигнала электрическое поле

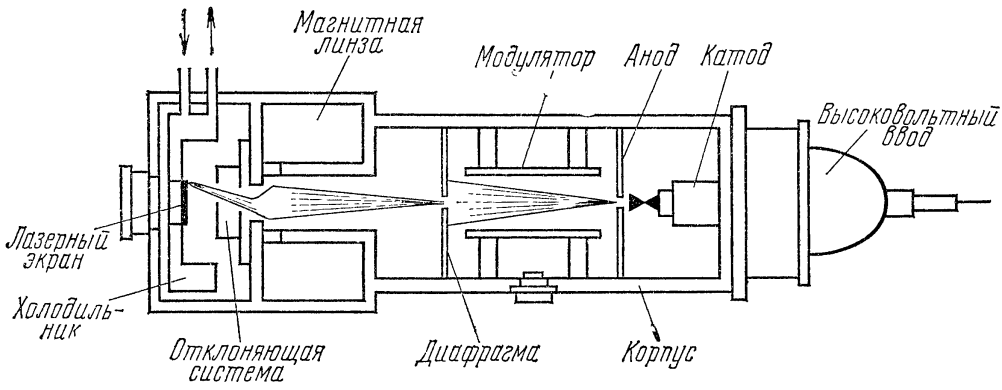


Рис. 1.10. Лазерный кинескоп

между ними изменяется и электронный пучок частично или полностью проходит через щель. Так осуществляется модуляция интенсивности электронного пучка. Фокусировка электронного пучка диаметром 10 мкм на полупроводниковый экран осуществляется с помощью магнитной линзы. Образование растра происходит с помощью обычной телевизионной отклоняющей системы. Полученное на лазерном экране изображение объективом проецируется на экран требуемого размера. Все элементы трубки размещены в металлическом корпусе длиной 50—70 см, который является надежной защитой от рентгеновского излучения. При плотности электронного пучка 100—150 А/см^2 и энергии электронов в несколько десятков килоэлектрон-вольт удельная мощность пучка достигает огромных значений и возможно сильное нагревание и даже прогорание экрана, размеры которого невелики (1 см^2). Поэтому необходимо активное охлаждение экрана, что достигается установкой полупроводниковой мишени на сапфировую подложку, которая охлаждается азотом или полупроводниковым холодильником.

Разработка ПКГ-трубок также имеет свои технические трудности. получение монокристаллов для мишеней; охлаждение экрана; защита от рентгеновского излучения; необходимость применения специальных электронных пушек; громоздкость источников питания. Как только эти проблемы будут успешно решены, можно будет отказаться от телепроекторов, использующих ионные лазеры и оптико-механические развертки светового луча, и начать практическое использование лазерных кинескопов [1.9].

1.2. Получение голограмм и их свойства

Запись и восстановление волнового фронта

Голография основана на записи и последующем восстановлении волнового фронта рассеянного объектом света [1.2, 1.4, 1.16—1.22]. Первый этап использует явление интерференции при взаимодействии двух когерентных пучков (рис. 1.11). Лазерным светом освещают объект и зеркало. Свет, отраженный объектом (предметный волновой фронт, предметный пучок) и зеркалом (эталонный волновой фронт, или опорный пучок, или когерентный фон), пересекается в определенной области пространства и взаимодействует

между собой, образуя пространственное интерференционное поле, поле узлов и пучностей, максимумов и минимумов интенсивности. Если в этом пространстве поместить фоточувствительную среду, то она зарегистрирует часть этого интерференционного поля. Такая светочувствительная среда после фотохимической обработки называется голограммой. Если расстояние между соседними интерференционными максимумами намного превышает толщину фотоэмульсии, то такую голограмму называют плоской (или тонкой, двумерной). Внешний вид голограммы показан на рис. 1.12*а*. В простейшем случае голограмма представляет собой чередование светлых и темных полос (рис. 1.12*б*); при достаточно сложной сцене структура голограммы становится существенно нерегулярной (рис. 1.12*в*).

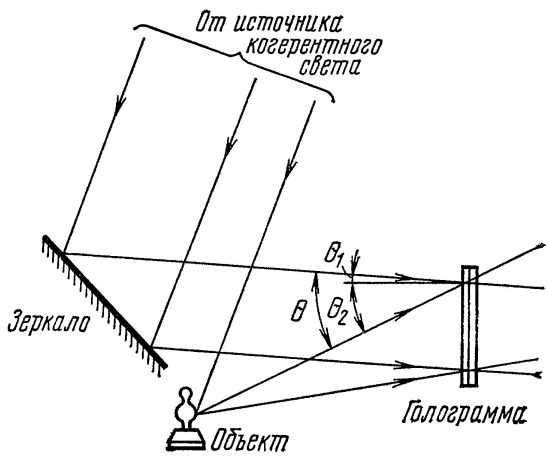
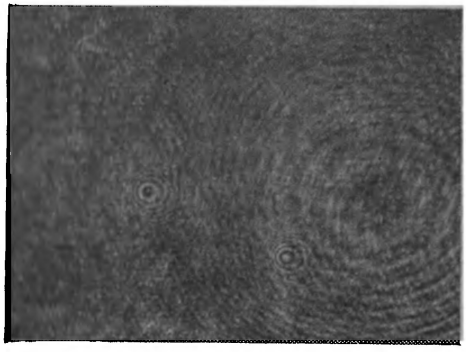


Рис. 1.11. Запись голограммы



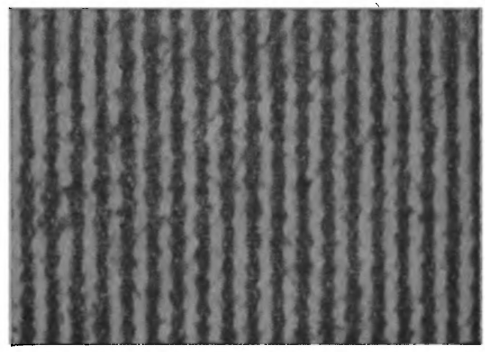


Рис. 1.12. Структура голограммы

Число интерференционных полос, т. е. количество светло-темных пар линий, на единицу длины голограммы называется пространственной частотой. Она увеличивается с увеличением угла между взаимодействующими пучками $\theta=\theta_1+\theta_2$ и уменьшением длины световой волны λ:

$$\nu = \frac{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}{\lambda}, \tag{1.10}$$

или, при равенстве нулю одного из углов, т. е. в случае, когда голограмма расположена перпендикулярно к направлению одного из пучков,

$$\nu = (\sin\theta)/\lambda \tag{1.11}$$

или, при равенстве углов $\theta_1=\theta_2$:

$$\nu = \frac{2\sin\frac{\theta}{2}}{\lambda}. \tag{1.12}$$

Если световые волны падают на фотопластинку с одной стороны, то пространственная частота не зависит от показателя преломления среды и поэтому будет неизменной как в воздухе, так и в фотоэмульсии. Это объясняется тем, что уменьшение λ и $\sin\theta$ происходит на одинаковую величину (в n раз, где n — показатель преломления среды).

Период интерференционной решетки, т. е. расстояние между смежными светлыми или темными линиями

$$d = \frac{1}{\nu} = \frac{\lambda}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}. \tag{1.13}$$

При использовании гелий-неонового лазера ($\lambda=0{,}6328$ мкм) пространственная частота ν для некоторых углов, а также отношение ее периода к длине волны λ имеют значения (см. табл. 1.2).

ТАБЛИЦА 12

$\theta°$	ν линий/мм при $\lambda=0{,}63$ мкм	d/λ
0,5	13,8	115
1	27,6	57,5
5	136	11,7
30	820	1,94
90	2240	0,71
180	3170	0,5

Можно видеть, что начиная с углов в несколько градусов пространственная частота становится достаточно высокой, а ее период соизмерим с длиной волны.

Отличие голографического процеса записи от обычного фотографирования заключается в том, что на голограмме записана не только амплитудная, но и фазовая информация, выраженная в виде чередования по определенному закону светлых и темных полос. Отсюда и происхождение слова голография: от греческих слов «олос» — полный и «графо» — пишу, т. е. запись полной информации. Голография была изобретена Деннисом Габором. В 1947 г. он предложил, а в 1948 г. опубликовал однолучевую схему для голографирования полупрозрачных плоских объектов. В 1961 г. Эммет Лейт и

Юрис Упатниекс усовершенствовали исходную схему Габора, предложив свою двухлучевую (с наклонным опорным пучком) схему формирования плоских голограмм непрозрачных трехмерных объектов.

Комплексная амплитуда поля в плоскости голограммы является результатом взаимодействия двух световых пучков: опорного с амплитудой A_0 и линейно меняющейся фазой αx и предметного с амплитудой $A(x)$ и фазой $\varphi(x)$:

$$A_\Sigma = A_0 e^{i\alpha x} + A(x) e^{i\varphi(x)} . \qquad (1.14)$$

Возведя модуль этого выражения в квадрат, получим зарегистрированную фотоэмульсией интенсивность

$$I(x) = A_0^2 + A^2(x) + 2A_0 A(x) \cos[\alpha x - \varphi(x)]. \qquad (1.15)$$

Можно видеть, что фаза рассеянной объектом волны $\varphi(x)$ сохраняется.

Амплитудное пропускание фотоэмульсии голограммы $t(x)$ зависит от интенсивности падавшего света $I(x)$ и коэффициента контрастности γ фотоматериала и пропорционально выражению [1.17]:

$$t(x) \quad \frac{1}{\sqrt{I^\gamma(x)}} = [I(x)]^{-\gamma/2} = \{A_0^2 + A^2(x) + 2A_0 A(x) \cos[\alpha x - \varphi(x)]\}^{-\gamma/2} \approx$$

$$\approx A_0^{2(-\gamma/2)} - \frac{\gamma}{2} A_0^{2(-\gamma/2-1)} \{A^2(x) + 2A_0 A(x) \cos[\alpha x - \varphi(x)]\} =$$

$$A_0^{-\gamma} - \frac{\gamma}{2} A_0^{(-\gamma-2)} A^2(x) - \frac{\gamma}{2} A_0^{(-\gamma-2)} \, 2A_0 A(x) \cos[\alpha x - \varphi(x)] =$$

$$\frac{1}{2A_0^{\gamma+2}} [2A_0^2 - \gamma A^2(x) - \gamma A_0 A(x) e^{i\alpha x - i\varphi(x)} - \gamma A_0 A(x) e^{-i\alpha x + i\varphi(x)}].$$

(1.16)

При выводе этого уравнения, названного Габором уравнением голограммы, предполагалось, что эталонная волна значительно больше предметной $A_0 \gg A(x)$. Это позволило ограничить ряд Тейлора

$$(a+b)^n = a^n + na^{n-1} b + (n-1) a^{n-2} b^2 + \ldots \qquad (1.17)$$

первыми двумя членами ($a = A_0^2$, b — остальная часть уравнения в фигурных скобках).

Полученное выражение показывает, какие компоненты содержит восстановленная волна, полученная во второй стадии голографического процесса в результате освещения голограммы когерентным светом и его дифракции на интерференционной структуре (рис. 1.13). Фронт волны освещающего источника, проходя через голограмму, разрушается. Все прозрачные места голограммы сами начинают излучать световые волны в пространство за голограмму, образуя в результате их интерференции два дифракционных пучка, симметричных относительного освещающего и воспроизводящих мнимое (расходящаяся волна) и действительное (сходящая волна) изображения равной интенсивности.

Волна, прошедшая через голограмму без отклонения, лишь равномерно ослабленная, называется волной нулевого порядка дифракции и соответствует первому члену ур-ния (1.16). Отклоненная часть светового пучка, соответствующая исходной рассеянной

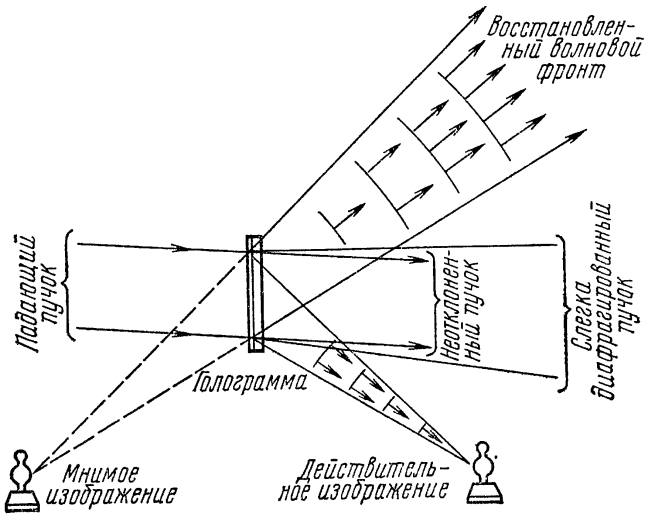


Рис. 1.13. Восстановление изображений с голограммы

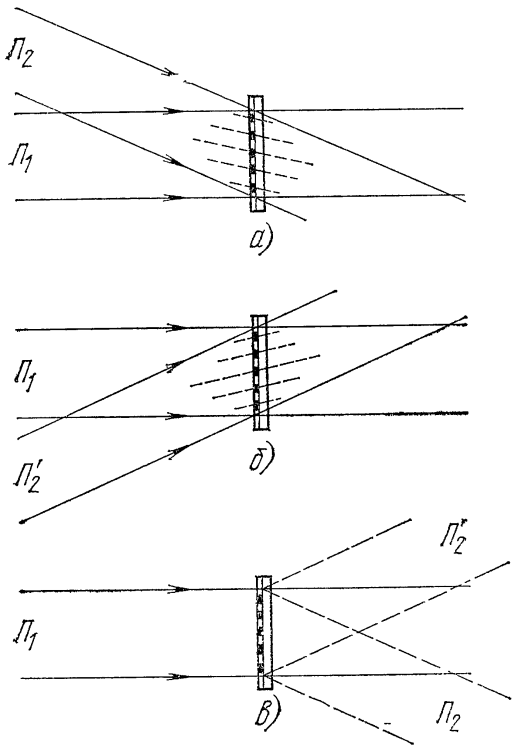


Рис. 1.14. Неопределенность, свойственная интерференционной картине плоской голограммы

объектом волне и отображенная третьим членом указанного уравнения, называется волной полос первого порядка дифракции. Она позволяет наблюдать мнимое изображение объекта. Ей соответствует сопряженная волна, формирующая действительное изображение объекта и называемая волной минус первого порядка дифракции [четвертый член ур-ния (1.16)]. В общем случае имеются волны более высоких порядков дифракции (± 2, ± 3-го и т. д.), формирующие изображения с большим угловым сдвигом. Для устранения этих добавочных изображений при записи голограммы интенсивность опорной волны необходимо выбирать значительно больше интенсивности предметной волны (в 3—10 раз). При выводе уравнения голограммы также

предполагалось $A_0 \gg A(x)$. Высшие дифракционные порядки не образуются также при поддержании определенного значения коэффициента контрастности фотоматериала $\gamma = -2$ [1.17].

Вторым членом ур-ния (1.16) по изложенным выше причинам также можно пренебречь. Физически он соответствует взаимодействию между собой световых волн от освещенных точек объекта и проявляется при воспроизведении в виде низкочастотных (концентрирующихся вокруг источника) шумов.

Принципиально воспроизведение, конечно, можно осуществить с помощью мощного источника некогерентного света, если светофильтром выделить достаточно узкий участок спектра и на пути светового пучка поставить узкую диафрагму.

Воспроизведение сразу двух изображений — мнимого и действительного — происходит вследствие того, что плоская голограмма отображает не весь объем интерференционного поля, а только его сечение. Особенности получения плоской голограммы проследим по рис. 1.14. Можно видеть, что световые пучки $П_2$ и $П'_2$, взаимодействуя с опорным пучком $П_1$, создадут пучности стоячих волн (рис. 1.14*а, б,* пунктир), эквидистантные плоскости которых хотя и сдвинуты по направлению, тем не менее их следы на голограмме в виде почернений фотослоя идентичны [1.2]. Так как голограмма «не знает», какой предметный пучок использовался при записи, $П_2$ или $П'_2$, то она вынуждена «на всякий случай» воспроизвести оба (рис. 1.14*в*).

Свойства плоских голограмм

Воспроизводимое голограммой мнимое изображение является оптическим аналогом объекта и позволяет не только ощущать его глубину, но и обеспечивает эффект бокового обзора (оглядывания). Действительно, через голограмму, как через волшебное окно в трехмерный мир, можно смотреть на изображение с разных направлений, ощущая его объемность и реальность. Размер этого окна определяется апертурой голограммы. На голограмме записано бесконечно большое число ракурсов, непрерывно переходящих друг в друга. Изменение параллакса можно наблюдать не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлении. Если детали объекта имеют разную глубину, то при наблюдении их изображений необходима различная фокусировка глаз.

Рассмотрим другие интересные свойства голограммы. Известно, что для получения голограммы и восстановления записанной на фотопластинке информации не нужны объективы. Голограмма демонстрирует расфокусированную волновую картину света, отраженного предметом. Поэтому любая точка предмета освещает всю голограмму и в каждую точку голограмы попадает световая информация от всех точек объекта. В результате записанное объемное изображение предмета получается закодированным, т. е. на голограмме нет элементов, напоминающих очертания оригинала. Это, в свою очередь, определяет два последующих важных свойст-

При нарушении целостности голограммы (царапины, пятна даже дробление ее на части) качество восстановленного объемного изображения почти не страдает. Однако потери информации все же существуют. Они проявляются в потере определенного числа записанных ракурсов, что уменьшает возможности оглядывания восстановленных изображений. Кроме того, в случае восстановления изображения с очень маленьких кусочков голограммы наступает ухудшение и разрешающей способности по объекту.

Голограмма способна передавать высокую контрастность восстановленного изображения. В фотографии и телевидении на светочувствительных поверхностях получают сфокусированное изображение объекта и при передаче очень ярких точек на сером фоне возникают трудности в фиксации и передаче большого динамического диапазона яркостей. В голографии такая трудность исключена, так как яркость отдельных точек объекта равномерно распределена по всей площади голограммы. Динамичесий диапазон яркости практически ограничен только рассеянием в слоях фотоэмульсии и теоретически может достигать значений порядка 10. Кроме того, экспериментально доказано, что искажения полутонов голограммы (числа уровней квантования) существенно не влияют на качество всего восстановленного изображения [1.23].

Воспроизводимые с голограммы изображения бывают только позитивные. Негативная копия с голограммы, полученная контактным способом, также дает позитивное изображение. Объясняется это тем, что структура восстановленной волны определяется законами изменения пространственной частоты и контраста интерференционных полос в плоскости голограммы, а они при изменении полярностью не меняются [1.2].

В работе [1.4] описаны возможные методы оптического копирования голограммы, которые заключаются, в основном, во вторичном голографировании восстановленного в когерентном свете волнового фронта. Такая перезапись возможна как для плоских, так и для трехмерных (см. ниже) голограмм, причем в последнем случае отпадает необходимость разделения полезного волнового фронта от других дифракционных порядков (их нет).

Кроме того, голограммы можно механически копировать подобно обычным грампластинкам. В работе [1.24] предложено подлежащие размножению исходные голограммы закодированного цветного оригинала на 16-мм кинопленке формировать на специальной пленке, изготовленной на основе из кронара и покрытой специальным светочувствительным слоем (чистым фоторезистом), после химической обработки которого в растворе NaOH получается рельеф в виде впадин и выступов (рис. 1.15). Глубина рельефа 0,05 мкм, среднее расстояние между пиками 1 мкм. Такая голограмма, регистрирующая интенсивность интерференционных полос в виде изменения толщины эмульсии, называется фазовой. С этой ленточной фазовой голограммы затем изготавливается никелевая матрица толщиной 150 мкм, используемая для неоднократной печати контактным способом голограмм на виниловой ленте. Для этого матрица совместно с чистой виниловой лентой прокатывается между двумя роликами, и рельеф никелевого оригинала под давлением переносится на пленку [1.25]. Такой метод копирования голограмм предложила фирма RCA в разработанной ею системе голографической цветной видеозаписи Селектавижн. Метод отличается простотой и дешевизной (стоимость виниловой пленки сравнима со стоимостью обычной

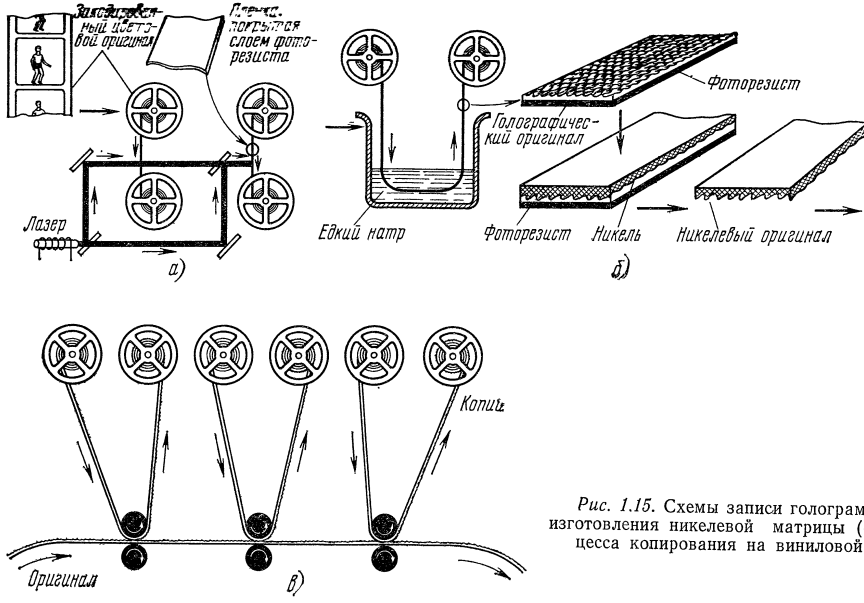


Рис. 1.15. Схемы записи голограмм (*а*); изготовления никелевой матрицы (*б*) и процесса копирования на виниловой ленте (*в*)

бумаги) и является поэтому перспективным для создания бытового голографического видеопроигрывателя (приставки к телевизору).

Предложен также способ получения рельефно-фазовых копий голограмм путем покрытия рельефного эмульсионного слоя синтетической (полиэфирной) смолой холодного отвердения, которая затем фиксируется на стеклянной подложке [1.26].

Воспроизводимое голограммой мнимое изображение совпадает по форме и по положению с самим предметом, если условия записи и воспроизведения идентичны. Если же при воспроизведении изменить длину волны источника света, увеличить (или уменьшить) саму голограмму и произвольно выбрать расстояние точечного опорного источника до голограммы, то геометрические размеры изображения изменятся, причем в общем случае продольное увеличение не соответствует поперечному [1.4].

Разрещающая способность голограммы зависит от величины ее эффективной апертуры D. Угловая разрешающая способность (рис. 1.16) подсчитывается по ур-нию:

$$\Delta\varphi = 1{,}22\lambda/D. \qquad (1.18$$

Линейная разрешающая способность по объекту Δx является производной величиной от углового разрешения и зависит, кроме того, от расстояния L между голограммой и объектом:

$$\Delta x = \Delta\varphi L = \frac{1{,}22\lambda}{D} L = \frac{1{,}22\lambda}{\beta}, \qquad (1.19$$

где $\beta = D/L$ — угол, стягиваемый голограммой на объекте.

На одну и ту же голограмму можно последовательно записать несколько волновых фронтов от различных объектов, если они пространственно разнесены. Число последовательных экспозиций может быть достаточно довольно значительным. С другой стороны, один и тот же объект может одновременно или последовательно освещаться светом разных длин волн для формирования цветной двумерной голограммы [1.2]. Обычно как и в цветном телевидении, достаточно трех цветов: красного ($\lambda = 63{,}28 \times \cdot 10^{-8}$ м), зеленого ($\lambda = 51{,}45 \cdot 10^{-8}$ м) и синего ($\lambda = 48{,}80 \cdot 10^{-8}$ м). Световые пучки трех лазеров суммируются с помощью светоделительной оптической системы (дихроичных зеркал) и подаются на обычную голографическую схему, формируя на голограмме три интерференционные решетки. При воспроизведении цветное изображение получается в результате

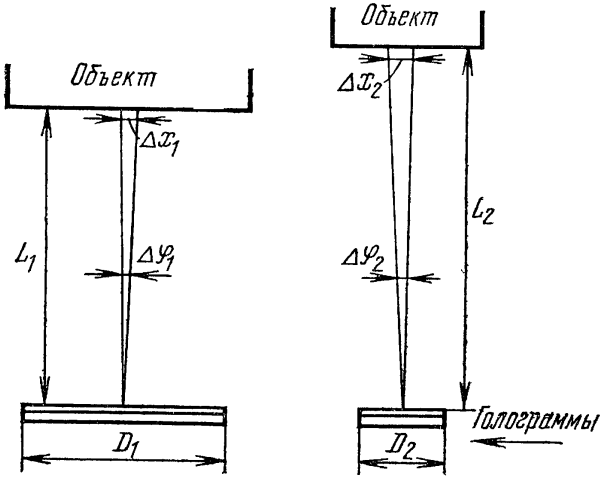


Рис. 1.16. Угловое и линейное разрешение голограммы

ложения изображений, восстановленных каждым из трех лучей при дифракции на «своей» решетке. Однако взаимодействие лучей и с «чужими» решетками приводит к тому, что появляется еще 9 мнимых и 9 действительных изображений, 15 из которых не используются и ухудшают условия воспроизведения.

Принципиально можно создать условия, при которых отдельные интерференционные решетки при записи пространственно разделяются, а при воспроизведении освещаются светом только одной длины волны. Тогда ложных изображений возникать не будет. Нужно лишь, чтобы перед голограммой при записи и воспроизведении находилась цветная оптическая мозаика типа пчелиный глаз [4.6].

Свойства трехмерных голограмм

Более простой и перспективный метод получения цветных изображений основан на использовании объемных светочувствительных эмульсий при формировании трехмерных голограмм. Этот метод формирования трехмерных голограмм, наиболее полно отражающих оптические свойства объекта, разработан советским ученым Юрием Николаевичем Денисюком в 1962 г. [1.27][1]).

Для получения трехмерной голограммы объект освещают через объемную светочувствительную эмульсию. Свет отражается от объекта (объектом является зеркало на рис. 1.17*а*) и, возвращаясь назад, интерферирует с опорным пучком под углами, близкими к 180°. Плоскости пучностей и соответственно плоскости по-

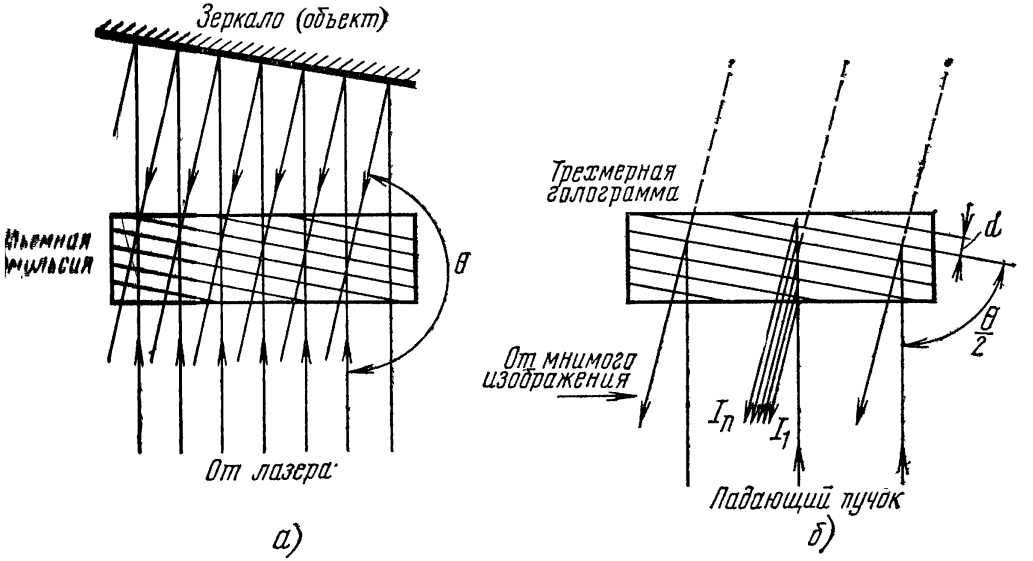


Рис. 1.17. Получение трехмерных голограмм (*а*) и воспроизведение с них изображений (*б*)

[1]) За цикл работ «Голография с записью в трехмерной среде» Ю. Н. Денисюку в 1970 г. присуждена Ленинская премия и он избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

чернения (полупрозрачные отражающие слои металлического серебра после проявления эмульсии), располагаясь по биссектрисе угла θ между направлениями встречных пучков, будут почти параллельны плоскости голограммы и удалены друг от друга на расстояние [1.21]

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \frac{\theta}{2}}, \qquad (1.2$$

где n — показатель преломления светочувствительной эмульсии; λ — длина волны в воздухе.

Если $\theta = 180°$, то $d_{мин} = \lambda/2n$. При интерференции двух параллельных пучков (рис. 1.17*а*) плоскости почернения параллельны друг другу и эквидистантны во всем объеме светочувствительного слоя.

Такая система полупрозрачных плоскостей серебра при освещении прямым опорным пучком восстанавливает только мнимое изображение, причем за счет зеркального отражения света, а не его дифракции (рис. 1.17*б*). Действительное изображение, а также нулевой порядок дифракции отсутствуют, так как подобная голограмма содержит полную информацию об интерференционном поле в определенном объеме и поэтому неопределенность, свойственная записи только одного сечения этого поля, отсутствует. При использовании обратного опорного пучка восстанавливается действительное изображение.

Еще одной интересной и важной особенностью трехмерных голограмм является то, что они позволяют воспроизводить изображения в белом свете. При этом из сплошного спектра выделяются только те составляющие, которые использовались при записи, т. е. осуществляется цветовая селекция. Это получается за счет того, что световые пучки I_1—I_n, отражаясь от разных слоев, будут совпадать по фазе и усиливать друг друга лишь для одной или нескольких вполне определенных длин волн, для которых разность хода лучей равна целому числу длин волн (закон Брегга) [1.21]:

$$2d \sin \frac{\theta}{2} = \kappa \lambda_э, \qquad (1.2$$

где $\lambda_э$ — длина волны в эмульсии; κ — целое число; $\theta/2$ — угол скольжения, образуемый направлениями распространения волн и плоскостями почернения. Для волн, имеющих другую длину волны, синфазность будет нарушена и голограмма отразит их значительно слабее.

При известных значениях d и λ ориентация голограммы относительно воспроизводящего источника должна быть вполне определенной. Если повернуть голограмму на несколько градусов, изображение пропадает, причем критичность ориентации повышается с увеличением толщины эмульсии. Поэтому на одну и ту же трехмерную голограмму можно последовательно записать и потом во

произвести много изображений, каждый раз смещая положения источников когерентного света (голограмма начинает приобретать свойства кристалла, голографическая память которых может быть очень большой). Если при воспроизведении используется белый полихроматический свет или смесь многих монохроматических составляющих, то запись разных изображений путем смещения положения источников усложняется. Дело в том, что при вращении голограммы (изменении угла скольжения) условие Брегга может последовательно выполняться для целого ряда длин волн источника воспроизведения, и одноцветное изображение будет многократно просматриваться с разных направлений в ложных цветах, создавая помехи для наблюдения с этих направлений других изображений.

Таким образом, трехмерные голограммы при определенных условиях позволяют воспроизводить в лучах белого света высококачественные многоцветные и объемные изображения, практически не отличимые от объекта. Точность воспроизведения изображений повышается с увеличением толщины эмульсии, т е когда в ней образуется больше поверхностей почернения. Подробное рассмотрение вопросов регистрации интерференционных полей в светочувствительном объеме можно найти в [1.2].

Материалы для регистрации голограмм

Регистрация голограмм обычно осуществляется с помощью галоидосеребряной фотографической эмульсии. Она является нелинейным приемником света. Степень этой нелинейности характеризуется коэффициентом контрастности фотоматериала γ. Известно, что коэффициент контрастности определяет значение дифракционной эффективности голограммы D, равной отношению светового потока $F_{\pm 1}$, образующего действительное и мнимое изображения первого порядка, к потоку $F_{\text{пад}}$, падающему на голограмму

$$D = F_{\pm 1} / F_{\text{пад}} . \qquad (1.22)$$

Частный случай $\gamma = -2$ (позитивная копия голограммы) соответствует линейной записи, когда высшие порядки дифракции не образуются. Максимальные значения дифракционной эффективности для различных типов голограмм приведены в табл. 1.3 [1.4, 1.21].

Все пространственные частоты, получаемые в результате интерференции предметного и опорного пучков, должны

ТАБЛИЦА 1.3

Тип голограммы	Дифракционная эффективность D, %
Тонкая амплитудная	6,25
Тонкая фазовая	33,9
Толстая амплитудная, работающая на пропускание	3,7
Толстая фазовая, работающая на пропускание	100
Толстая фазовая, работающая на отражение	7,2
Толстая амплитудная, работающая на отражение	

быть зарегистрированы фотоэмульсией. Уменьшение контрастности интерференционных полос для высших пространственных частот вследствие конечных размеров зерен эмульсии повлечет за собой не уменьшение разрешающей способности по всему изображению, как в телевидении, а понижение яркости определенных периферических участков восстановленного изображения.

Если размер микрокристаллов галоидного серебра AgBr будет меньше расстояний между поверхностями почернения в 10—20 раз то эмульсия станет прозрачной и не будет рассеивать свет. Например, для получения голограмм во встречных пучках (пространственная частота $\nu \approx 5000$ лин/мм, период $d \approx 200$ нм) размер зерна высокоразрешающей эмульсии должен быть около 10 нм.

Следует иметь в виду, что с увеличением разрешающей способности светочувствительность материала падает. Области спектральной чувствительности фотографических материалов должны соответствовать линиям излучения применяемых лазеров, что достигается с помощью специальных оптических сенсибилизаторов. Параметры некоторых, применяемых в голографии галоидосеребряных фотоматериалов приведены в табл. 1.4 [1.4, 1.28, 1.29].

Голограммы могут формироваться и на других светочувствительных средах, способных, в частности, выдерживать определенное число циклов запись—воспроизведение — стирание и не требующих химической обработки, что позволяет проектировать динамические системы воспроизведения объемных изображений в «реальном масштабе времени». Примером могут служить фотохромные материалы — фотохромные стекла с добавлением хлористого и бромистого серебра и фотохромные жидкие или пластмассовые пленки, содержащие органические красители. Эти материалы обладают тем свойством, что под воздействием света определенной части спектра они темнеют, а их просветление (отбеливание) происходит при облучении светом другой длины волны. Разрешающая способность фотохромных материалов, в особенности органических пленок, высока и приближается к молекулярному уровню, однако они имеют очень низкую чувствительность и пока еще достаточно большую инерционность.

Запись голограмм осуществляется также на термопластических и фототермопластических слоях, магнитных пленках с мелкодоменной структурой и других фоторегистрирующих средах. Обзор «необычных» фотоматериалов для голографии сделан в [1.30].

Установка для получения голограмм

Формирование широких коллимированных, расходящихся и сходящихся световых пучков из генерируемого лазером узкого пучка с диаметром $d \approx 2{,}5$ мм осуществляется с помощью объективов, линз, отражательных и полупрозрачных зеркал и призм [1.4]. Все эти элементы крепятся в оправы, имеющие достаточно степеней свободы и с помощью специальных стоек жестко фиксированные на оптическом столе. Светочувствительные пластинки для формирования голограмм могут зажиматься в одну из этих оправ, а пленки фиксируют с помощью специальных приспособлений или используют для этой цели фотоаппарат.

Конструкция экспериментального оптического стола для получения голограмм, собранного на кафедре телевидения ЛЭИС, приведена на рис. 1.1. Он представляет собой Г-образную бетонную плиту *1* весом около 800 кГ, покоящуюся на амортизаторах *6* (футбольные мячи или медицинские кислородные подушки), в которые от компрессора *9* через распределительную коробку нагнетается воздух. На плите жестко закреплен гелий-неоновый лазер непрерывного действия *2* (ЛГ-35, ЛГ-36, ЛГ-36А или ЛГ-38) и две половины опт

ТАБЛИЦА 14

Страна	Фирма	Название материала	Толщина эмульсионного слоя h, мм	Средний диаметр зерна d, мм	Светочувствительность $S_{0,2}$	Разрешающая способность R, мм$^{-1}$	Максимум спектральной светочувствительности λ, нм
СССР	Завод технических фотопластинок	«Микрат-ВР1»	20	—	—	1500	—
		«Микрат-ВР2»	20	—	—	1500	—
		«Микрат-ВР»	20	80	0,03	1300 [1.28] 1500 [1.29] 2000 [1.4]	600—680
СССР	Химический завод им. Куйбышева	«Микрат-900»	10	—	0,03	1500 [1.28, 1.29] 2800 [1.4]	570—650
СССР	Разработка Госниихимфотопроекта	«Прозрачные» фотопластинки ПЭ-1	10	5—6	0,001 (0,01 с доп. сенсиб.)	3000	630
США	Истмен-Кодак	649 *F*	15	60	0,007	1850 [1.28] 2000 [1.29] >5000 [1.4]	420—460
ГДР	ОРВО	«Микрат-*LO*-2»	7—9	90	0,01	2000	450—550

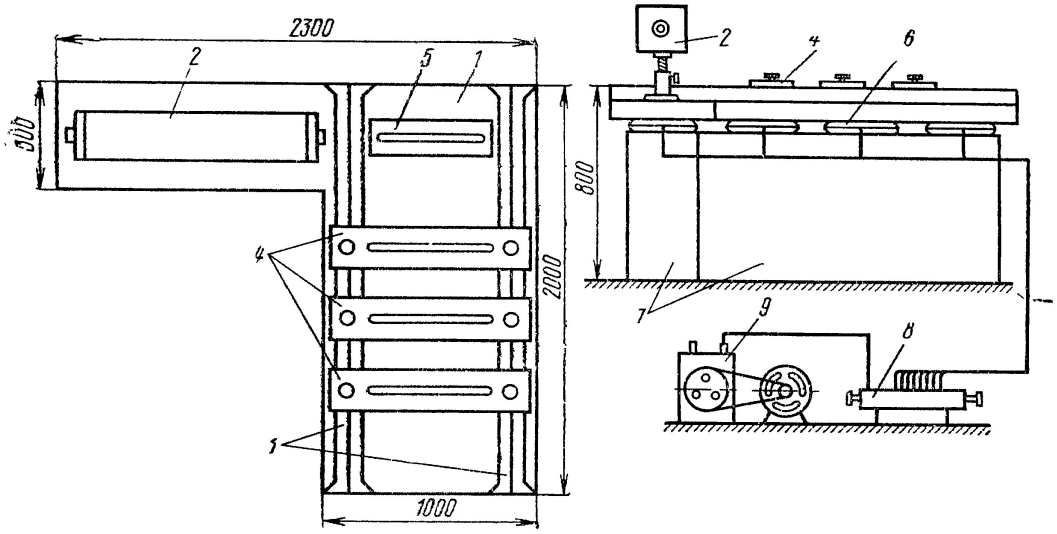


Рис. 1.18. Конструкция оптического стола:

1 — бетонная плита; *2* — гелий-неоновый лазер; *3* — оптическая скамья; *4* — подвижные платформы; *5* — неподвижная платформа; *6* — амортизаторы; *7* — основание установки; *8* — распределительная коробка; *9* — компрессор

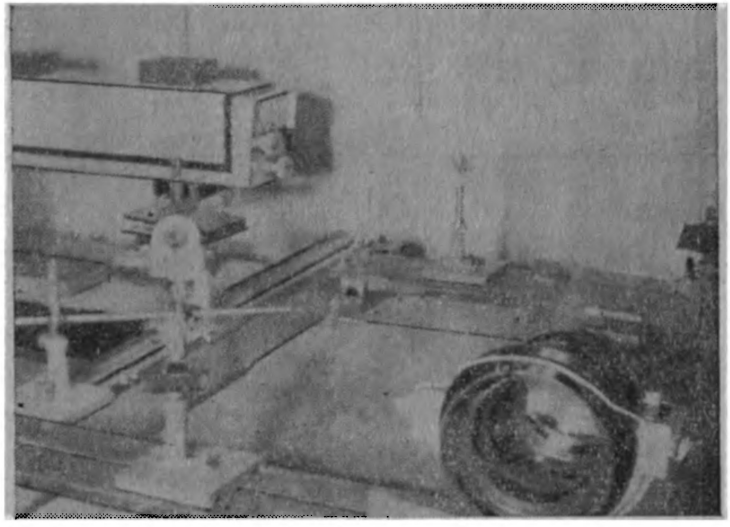


Рис. 1.19. Общий вид оптического стола

ческой скамьи ОСК-3 *3*. На оптической скамье размещены три подвижные платформы *4* и одна неподвижная *5*. На платформах крепятся как входящие в комплект ОСК-3 рейтеры для крепления оптики и фотоматериалов, так и другие, разработанные для этой же цели устройства. На рис. 1.19 приведена фотография общего вида оптического стола.

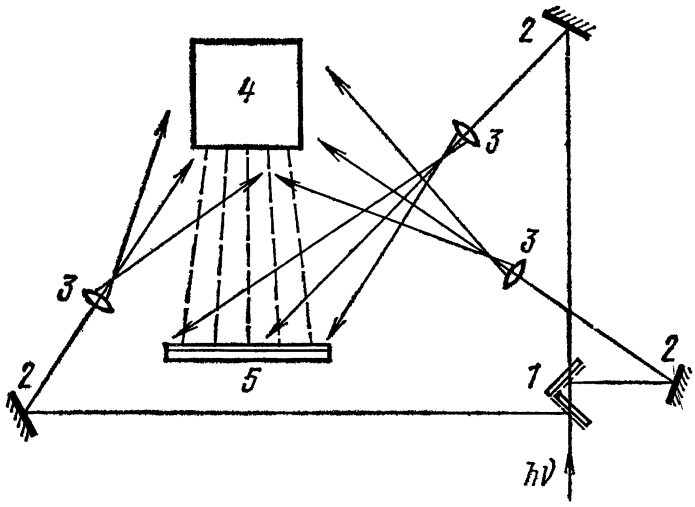


Рис. 1.20. Голографическая схема при двусторонней подсветке объекта:

1 — светоделительное устройство; *2* — зеркала; *3* — объективы; *4* — объект; *5* — голограмма

Используя элементы интерференционного стола, можно собрать любую схему записи голограмм трехмерных объектов и восстановления их изображений. На рис. 1.20 приведен пример построения голографической схемы при записи трехмерного объекта, освещенного с двух сторон.

При голографировании сцены с достаточно большой глубиной, соизмеримой с длиной когерентности источника или даже превышающей ее, систему подсветки необходимо разделить по глубине на несколько частей (рис. 1.21). Это необходимо для того, чтобы расстояния, пройденные отраженным от различных частей объекта светом, были примерно одинаковые и отличались от расстояния, пройденного эталонным пучком не более чем на длину когерентности (15—20 см для гелий-неонового лазера типа ЛГ-36). Точное выравнивание длин путей производят обычно для центральных по глубине участков сцены.

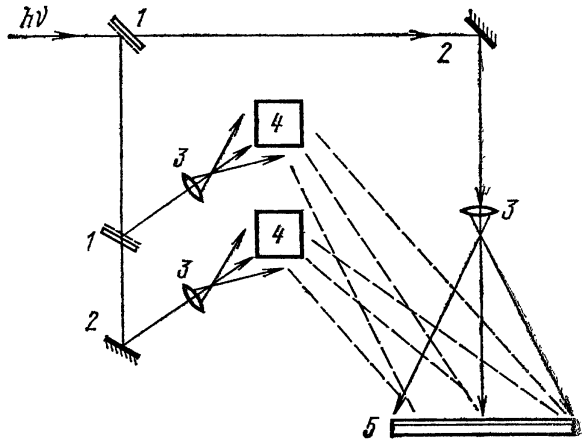


Рис. 1.21. Голографическая схема для объектов с большой глубиной:

1 — полупрозрачное зеркало; *2* — зеркало; *3* — объективы; *4* — объекты; *5* — голограмма

Применения голографических методов для отображения оптических свойств объекта многочисленны и разнообразны [1.4]. Здесь будет рассмотрено только одно из них — возможность использования голографических методов в телевидении.

2

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.1. Формирование оптических и телевизионных изображений

Основные особенности образования оптических изображений

Существующие системы воспроизведения изображений (например глаз, фотографическая система, телевизионная система) объединяет общая задача воспроизведения данных об объекте, которые заключены в испускаемом или отражаемом им оптическом излучении. Решение этой задачи любой системой, в свою очередь, предполагает в качестве неотъемлемой части процесс формирования оптического изображения.

В основе законов формирования оптического изображения лежит принцип Гюйгенса — Френеля, согласно которому свет, излучаемый точечным источником, распространяется по всем направлениям в виде сферических световых волн. Наличие у оптического прибора входного зрачка приводит к тому, что из всей поверхности световой волны вырезается часть, равная апертуре входного зрачка, из которой строится изображение данного точечного источника (рис. 2.1).

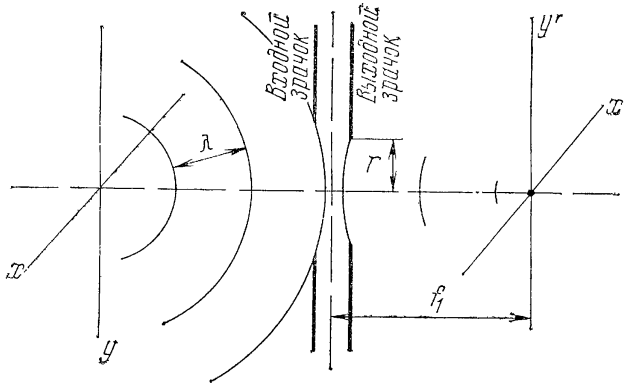


Рис. 2.1. Упрощенная схема работы оптической системы

Согласно тому же принципу Гюйгенса — Френеля, каждая точка любой волновой поверхности, а следовательно, и каждая отдельная точка волновой поверхности в отверстии оптической системы может рассматриваться как центр новой сферической элементарной волны. Поэтому световое возмущение должно распространяться из отверстия оптического прибора дальше во всем пространственном угле, а световое явление, возникающее в плоскости изображения, следует рассматривать как результат интерференции всех встречающихся здесь элементарных волн. Действительно, для точечного источника элементарные волны выходят из одного центра излучения, значит, они когерентны и способны интерферировать между собой.

До определенной точки плоскости изображения различные элементарные волны проходят неодинаковые пути, поэтому результат интерференции различен для разных точек плоскости. Это обстоятельство определяет существование предельного вида оптического изображения, лучше которого с помощью данного оптического прибора получить невозможно. Для точечного источника предельным видом изображения является дифракционная фигура, представляющая собой в плоскости изображения яркое пятно, окруженное кольцами, интенсивности которых относительно слабы.

Любой сложный объект (и самосветящийся, и освещенный) можно рассматривать состоящим из отдельных излучателей (например, атомов). Предельным видом изображения такого объекта (если можно считать, что каждый из его

точечных излучателей действует как независимый источник света, т. е. некогерентные источники) будет изображение, в котором освещенность в любой точке представляет собой сумму освещенности центрального пятна дифракционной фигуры соответствующей точки объекта и вкладов освещенностей, являющихся результатом дифракции всех остальных точек объекта. При этом количественная мера различимости оптическим прибором двух точечных источников равной интенсивности определяется из выражений:

$$\rho' = \frac{1{,}22\lambda}{2\alpha'} = \frac{1{,}22\lambda}{2\frac{r}{f'}} = \frac{1{,}22\lambda}{\ddot{O}}, \qquad (2.1)$$

где ρ' — радиус первого темного кольца дифракционного пятна; λ — длина световой волны; α' — угловое отверстие оптического прибора в пространстве изображений; r — радиус зрачка оптического прибора; f' — радиус сферической волны, проходящей плоскость зрачка и имеющий центр в середине дифракционного пятна; $\ddot{O}$ — относительное отверстие оптического прибора. Угол, под которым будет виден радиус первого темного кольца дифракционной фигуры из центра выходного зрачка оптического прибора (угловое разрешение),

$$\Delta\varphi' = \frac{\rho'}{f'} = \frac{1{,}22\lambda}{D}, \qquad (2.2$$

где — D диаметр выходного зрачка оптического прибора. Выражения (2.1) и (2.2) справедливы для пространства изображений. Они остаются справедливы и для пространства объектов, если коэффициенты преломления сред обоих указанных пространств одинаковы.

Рассмотренная картина образования изображения сложного объекта носит в оптике название метода Эри [2.1—2.3]. Выше были учтены только те условия, когда отдельные излучатели объекта полностью некогерентны. Именно поэтому оптическое изображение протяженного объекта представляет собой результат суммирования освещенностей перекрывающихся дифракционных фигур в каждой точке плоскости изображения. Освещенности же в данном случае пропорциональны квадратам амплитуд отдельных дифракционных фигур. Дело обстоит иначе, если отдельные излучатели объекта когерентны между собой.

Более подробно вопросы когерентности световых потоков были рассмотрены в первой главе при изложении физических принципов работы оптических квантовых генераторов (лазеров). Здесь же ограничимся тем, что временна́я и пространственная когерентность световых потоков будет иметь место всегда, если эти потоки получены от точечного источника, излучающего одну элементарную волну [2.4]. Таких источников в природе нет. Даже атом не является таковым, так как излучает световые волны в виде пакетов (цугов) некоторой длительности $\tau_ц$, а следовательно, не может в полной мере удовлетворить требованию временной когерентности (излучает не одну, а ряд элементарных волн).

Следствием сказанного выше о когерентности является то, что когерентные световые потоки от протяженных объектов возможно получить только в том случае, если эти объекты не являются самосветящимися, а освещаются источником когерентного излучения. При этом условии сложение дифракционных изображений отдельных точек объекта следует выполнять, принимая во внимание интерференцию волн, выходящих из рассматриваемых точек объекта. В каждой точке плоскости изображения требуется сначала суммировать амплитуды перекрывающихся здесь дифракционных фигур, а затем путем возведения в квадрат результирующей амплитуды определить освещенность. Исходя из этого, разрешение элементов объекта в когерентном свете

$$\rho'_{ког} = \frac{1{,}83\lambda}{2\alpha'}. \qquad (2.3)$$

Угловое разрешение элементов объекта

$$\Delta\varphi'_{ког} = \frac{1{,}83\lambda}{D}. \qquad (2.4)$$

Следует заметить, что ур-ния (2.3) и (2.4) справедливы, если свет падает на объект перпендикулярно, т. е. по нормали, совпадающей с оптической осью оптического прибора. При наклонном освещении объекта расчет взаимодействия дифракционных фигур отдельных точек объекта следует производить, принимая во внимание разность фаз, возникшую в результате неодновременного попадания световой волны на эти точки [2.3].

Таким образом, рассмотренная картина образования оптического изображения (метод Эри) показывает, что при освещении объекта когерентным светом по нормали, совпадающей с оптической осью, один и тот же оптический прибор обладает существенно меньшей разрешающей способностью, чем при освещении объекта некогерентным светом. Сравнение ур-ний (2.1), (2.2) и (2.3), (2.4) соответственно позволяет видеть, что в когерентном свете разрешающая способность оптического прибора в 1,5 раза хуже, чем в некогерентном. Величина ухудшения разрешающей способности оптического прибора в когерентном свете, равная 1,5, получилась в данном случае как следствие того, что порог различимости изображений двух точечных источников одинаковой интенсивности определялся критерием Релея. Критерий Релея предполагает 20-процентное падение освещенности в изображении между двумя максимумами освещенности.

Механизм образования оптического изображения может также быть рассмотрен с точки зрения фильтрации оптическим прибором пространственных частот объекта [2.1, 2.5]. Теория фильтрации оптическим прибором пространственных частот объекта позволяет определить предельное различие разрешающей способности оптического прибора в когерентном и некогерентном свете, которое оказывается равным 2. Это видно из рис. 2.2. Кривые *1* и *2* рис. 2.2 показы-

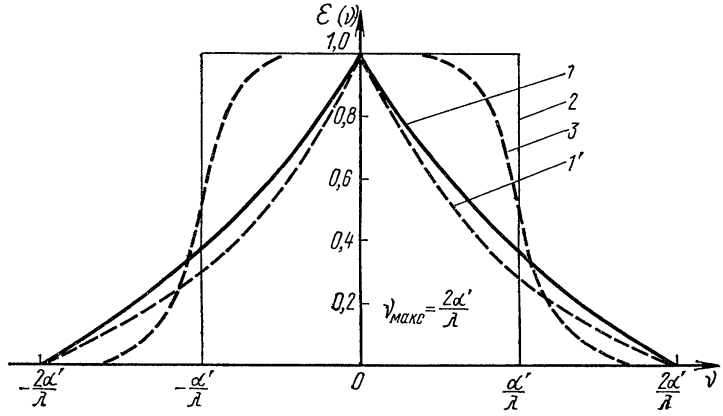


Рис. 2.2. Изменение функции фильтрования оптического прибора

вают изменение функции фильтрования оптического прибора $\varepsilon(\nu)$ и соответствуют идеальным случаям абсолютно некогерентного и абсолютно когерентного освещений объекта. В реальных условиях освещение объекта производится частично когерентным светом. Для того случая характер изменения функции фильтрования показан кривой *3*. В зависимости от степени когерентности света форма кривой *3* приближается к предельным случаям (кривая *1* или *2*).

В соответствии с теоремой интерполяции распределение освещенности $E'(x', y')$ будет полностью известно, если известна освещенность в конечном числе дискретных точек q [2.1, 2.6]. Для идеального оптического прибора это число точек на квадратный миллиметр будет равно:

в случае некогерентного света

$$q_{\text{неког}} = \left(\frac{2\ddot{O}}{\lambda}\right)^2, \qquad (2.5$$

в случае когерентного света

$$q_{\text{ког}} = \left(\frac{\ddot{O}}{\lambda}\right)^2. \qquad (2.6$$

Для оптической системы глаза период предельной пространственной частоты

$$d_{\text{мин.гл}} = \frac{\lambda}{2n_{\text{гл}} \cdot \frac{r}{f'_{\text{гл}}}} = \frac{\lambda}{n_{\text{гл}}\, \ddot{\text{О}}_{\text{гл}}}, \qquad (2.7)$$

где $n_{\text{гл}} = 1{,}336$ — среднее значение коэффициента преломления глаза; $f'_{\text{гл}} = 17{,}1$ мм — заднее фокусное расстояние глаза при его аккомодации на бесконечность. При $\lambda = 0{,}55$ мкм и $r = 1$ мм, $d_{\text{мин.гл}} = 4{,}7$ мкм.

Диаметр зрачка $D_{\text{гл}} = 2r = 2$ мм обеспечивает наименьшие аберрационные искажения оптики глаза. Дифракционного ограничения также еще нет, поскольку диаметр зрительного элемента сетчатки $\delta_{\text{сет}} = 5$ мкм. При этих условиях глаз можно считать идеальным оптическим прибором [2.3]. В соответствии с критерием (2.5) оптика глаза в некогерентном свете разрешает на объекте $n_{\text{об}} = 16 \times 10^4$ элементов на квадратный миллиметр. В когерентном свете $n_{\text{об}} = 4 \times 10^4$. Сетчатка глаза имеет на одном квадратном миллиметре $q_{\text{сет}} = (1/\delta_{\text{сет}})^2 \approx 4 \cdot 10^4$ зрительных элементов.

Таким образом, в полосе пространственных частот, разрешаемых сетчаткой, различие в контрасте элементов объекта и изображения для некогерентного света еще не достигает максимального значения. Для когерентного света этого различия вообще нет в той же полосе пространственных частот (см. рис. 2.2). Следовательно, в когерентном свете воспринимаемое наблюдателем изображение должно быть максимально подобно объекту. Однако при высокой степени когерентности выполнению этого препятствуют одноцветность изображения и зернистая шумоподобная структура на воспроизводимом изображении [2.7].

Обычные условия наблюдения предусматривают некогерентное освещение объектов «белым» светом, т. е. наиболее привычными являются условия, при которых изображение цветное, отсутствует влияние зернистости, но различие в контрасте элементов объекта и изображения достаточно велико. Субъективные факторы восприятия изображений позволяют еще больше увеличивать это различие, что и используется при построении реальных систем воспроизведения, например телевизионных.

Телевизионное изображение

Телевизионная система преобразует изображения в видеосигнал с помощью передающей трубки, а затем воспроизводит их на экране приемной трубки. Схематически этот процесс показан на рис. 2.3. Конечным приемником телевизионной системы воспроизведения изображений является глаз наблюдателя. Поэтому она должна строиться так, чтобы по возможности наиболее полно удовлетворить привычные для глаза условия работы. Из рисунка видно, что увеличение угловых размеров объекта при телевизионной передаче будет равно

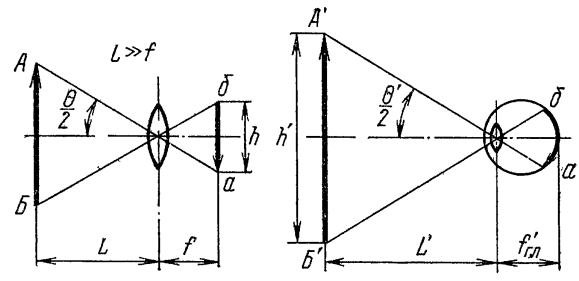


Рис. 2.3. Схема формирования и наблюдения изображений в системе воспроизведения

$$\beta_{\text{т}} = \frac{\operatorname{tg}\theta'/2}{\operatorname{tg}\theta/2} = \frac{fh'}{L'h} = \frac{a'\,б'\,f}{h\,f'_{\text{гл}}}, \qquad (2.8)$$

где θ - угол, под которым объект виден с места съемки; θ' — угол, под которым наблюдатель видит изображение объекта; h — высота изображения, формируемого объективом; f — фокусное расстояние объектива; L — расстояние до объекта; h' — высота наблюдаемого изображения; L' — расстояние рассмат-

ривания; $f'_{гл}$ — заднее фокусное расстояние глаза; $a'б'$ — размер изображения на сетчатке.

В соответствии с ур-нием (2.8) восприятие наблюдателем масштабных соотношений изображения объекта будет таким же, как при непосредственном наблюдении объекта с места съемки, когда $\beta_т = 1$, т. е. когда угол $\theta = \theta'$. При этом $L'h = fh'$ и $hf'_{гл} = a'б'f$.

Четкость изображения, воспринимаемая наблюдателем, будет определяться числом элементов, приходящихся на квадратный миллиметр сетчатки глаза Если это число $q_{сет} = 4 \cdot 10^4$, то при $\beta_т = 1$ глаз будет видеть такое же количество элементов в изображении, какое количество деталей объекта он видел бы с места съемки. Общее количество элементов на линейном участке сетчатки $a'б'$

$$Z = a'б' \sqrt{q_{сет}} = \frac{h f'_{гл}}{f} \frac{1}{\delta_{сет}}. \qquad (2.9)$$

Диаметр элемента сетчатки $\delta_{сет}$ виден из центра зрачка под углом $\delta_{сет}/f'_{гл} = \Delta\varphi'_{гл}/2$ (поскольку для разрешения двух элементов изображения, черного и белого, следует иметь два зрительных элемента сетчатки), т. е. можно записать

$$Z = \frac{2h}{f \Delta \varphi'_{гл}}, \qquad (2.10)$$

где $\Delta\varphi'_{гл}$ — угловое разрешение глаза.

Учитывая, что $\frac{h}{f} = 2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$, ур-ние (2.10) перепишем в виде

$$Z = \frac{4 \operatorname{tg} \theta/2}{\Delta \varphi'_{гл}}. \qquad (2.11)$$

Из ур-ния видно, что система воспроизведения может обеспечить наблюдателю условия рассматривания изображения, тождественные реальным условиям рассматривания объекта невооруженным глазом, если она имеет угол зрения, равный углу зрения глаза, а объектив обеспечивает угловое разрешение деталей объекта, равное угловому разрешению глаза. При этом, естественно, система воспроизведения должна обеспечить перенос всех элементов изображения $аб$ в изображение $A'Б'$. Расстояние рассматривания изображения должно быть равно

$$L' = \frac{h'}{2 \operatorname{tg} \theta/2} = \frac{2h'}{Z \Delta \varphi'_{гл}}. \qquad (2.12)$$

Глаз имеет достаточно большой угол зрения, однако эффективный угол зрения его равен приблизительно 15° [2.8]. Подставляя это значение в ур-ние (2.11) и учитывая, что $\Delta\varphi'_{гл} \approx 4{,}5 \cdot 10^{-4}$ (1′30″), получим $Z \approx 1200$. Следовательно, если в изображении $A'Б'$ системой воспроизведения обеспечивается разрешение $Z = 1200$ элементов, то глаз наблюдателя, находящегося на расстоянии $L' \approx 4h'$ должен видеть изображение с максимальной четкостью. Однако, как было показано в § 2.1, различие между распределением яркости на объекте и в изображении будет в этом случае максимальным, поскольку сетчатка глаза ограничивает полосу пространственных частот изображения величиной $\nu_{сет\ макс} = \frac{Z \Delta \varphi'_{гл}}{\delta_{сет}}$ Чтобы это различие было по возможности ближе к привычному для глаза, необходимо в изображении иметь по высоте не менее 2400 разрешаемых элементов (см. рис. 2.2).

Таким образом, условия наблюдения изображения, наиболее приближающиеся к реальным, может обеспечить система воспроизведения, разрешающая по высоте изображения как минимум 2400 элементов. В настоящее время такими системами являются фотографическая и кинопроекционная системы воспроизведения. В современной телевизионной системе $Z = 1200$ элементов относят

и растровой структуре изображения (строки и промежутки между строками). При этом лишь для $Z=600$ элементов (строк) могут быть обеспечены привычные условия восприятия их глазом. Это означает, что предельное разрешение элементов объекта, обеспечиваемое современной телевизионной системой, в любом случае останется в два раза худшим, чем разрешение их глазом, расположенным на месте съемочной камеры.

К объективам, которые работают в фотографической и кинопроекционной системах воспроизведения, должно быть предъявлено требование разрешения $\nu_{макс} \approx 200$ линий/мм, т. е. такое же, как у оптической системы глаза. Для современной телевизионной системы это требование облегчается. Здесь необходимо, чтобы объектив разрешал $\nu_{макс}=100$ линий/мм. Современные объективы не удовлетворяют первому условию [2.9, 2.10], поэтому именно они определяют качество изображения в фото- и киносистемах воспроизведения. В телевизионной системе объективы обеспечивают требуемое качество изображения, ограничения накладывает сама система воспроизведения.

Предположим теперь, что телевизионная система работает в когерентном свете. Предположим далее, что объектив передающей камеры обеспечивает разрешение только $Z=600$ элементов по высоте изображения в некогерентном свете. В когерентном свете разрешающая способность объектива хуже и он обеспечит разрешение $Z \approx 300$ элементов. Четкость изображения, воспринимаемая наблюдателем, должна уменьшиться вдвое. Контрастность же в мелких деталях должна несколько возрасти (см. рис. 2.2). Это может привести к повышению оценки наблюдателем качества воспроизводимого изображения за счет субъективных факторов.

Возрастание контрастности в мелких деталях при работе телевизионной системы в когерентном свете будет замечено наблюдателем в том случае, если система воспроизведения не окажет дополнительного влияния на функцию фильтрования объектива. Практически это выполнить невозможно, так как результирующая функция фильтрования представляет собой результат перемножения функций фильтрования объектива, системы воспроизведения и оптики глаза. Следовательно, при построении любой системы воспроизведения неизбежно увеличение различия между распределением яркости на объекте и в изображении. Следует стремиться обеспечивать такие ее (системы) характеристики, чтобы величина этого различия не превышала допустимую.

В телевидении существует понятие «нормального телевизионного изображения», обеспечиваемого «нормальной телевизионной системой» [2.8]. Если бы такая система была реализована, то было бы достигнуто минимальное различие между распределением яркости на объекте и в изображении. Однако такую систему построить невозможно. Имеется возможность реализовать телевизионную систему лишь «почти эквивалентную нормальной». В этом случае передающая и приемная трубки должны разрешать $Z_{тр}=2{,}3\,Z$ элементов (рис. 2.4, кривая *1*) каждая. Тогда при неограниченной полосе пропускания канала системой будет разрешаться $Z_т = 1{,}62\ Z$ элементов (рис. 2.4, кривая *2*).

В современной телевизионной системе характеристики, «почти эквивалентные нормальным», не обеспечиваются. Самое существенное ограничение накладывает недостаточная разрешающая способность современных передающих трубок [2.11]. Разрешающая способность системы снижается до $Z_т \approx Z/\sqrt{2}$ (рис. 2.4, кривая *3*). Различие между объектом и изображением становится больше максимально допустимого. В лучшем случае существующая телевизионная система обеспечивает разрешение $Z_т = Z$ элементов (рис. 2.4, кривая *4*). При этом распределение освещенности в

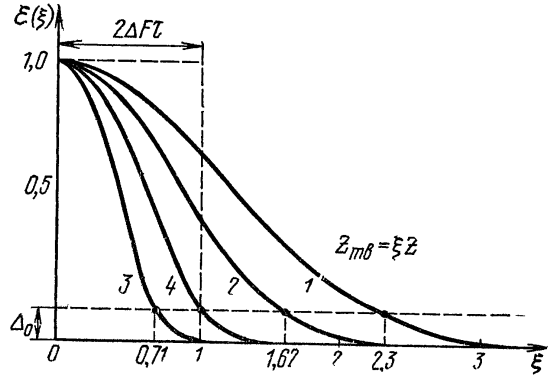


Рис. 2.4. Разрешающая способность телевизионной системы

воспроизводимом изображении будет минимально подобно распределению яр кости на объекте.

Указанные на рис. 2.4 характеристики разрешающей способности телеви зионной системы и отдельных ее звеньев (апертурно-частотные характеристики одинаково влияют на функцию фильтрования оптического прибора как в неко герентном, так и в когерентном свете. Иначе говоря, при работе телевизионно системы в когерентном свете повышения контраста в мелких деталях практи чески не будет. Субъективные факторы не могут повлиять на оценку качеств изображения. Использование когерентного света должно приводить к ухудше нию в два раза четкости изображения.

2.2. Голографическое изображение

Прежде чем перейти к рассмотрению особенностей образова ния изображения голографическим методом, следует еще раз под черкнуть, что основным условием в голографии является исполь зование когерентных световых потоков для формирования сигналь ного и опорного пучков. Это означает, что при использовании не скольких источников для создания необходимой освещенност сцены требуется строгая их взаимокогерентность и когерентност с опорным пучком, т. е. необходим всегда выполнять требования ка временно́й, так и пространственно когерентности источников. При это условии для рассмотрения процес сов образования изображения в го лографии возможно применить тео рию Аббе [2.3].

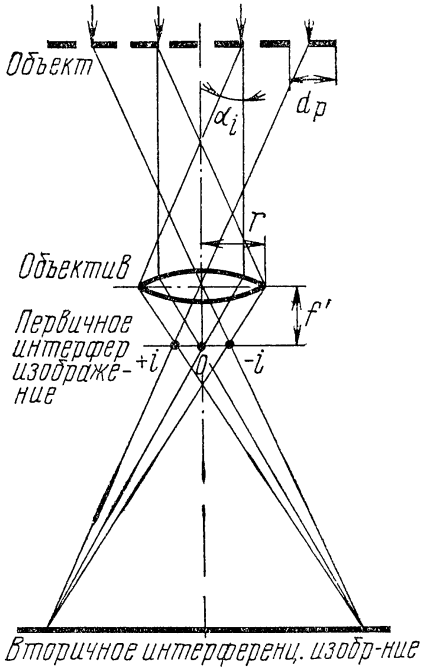


Рис. 2.5. Образование изображения объективом

Процесс образования оптическо го изображения в когерентном свете состоит из трех этапов, существую щих неразрывно: этапа дифракци света на объекте по i направления ($d_p \sin\alpha_i/\lambda = 0;\ \pm 1;\ \pm 2; \ldots; \pm i$), этапа отбора конечного числа ди фрагировавших волн объективом ($\alpha'_i \approx r/f'$); этапа их интерферен ции — получения на экране изобра жения объекта ($d'_{p\,\text{мин}} = 2\lambda f'/D$ (рис. 2.5). Подходя с этих же пози ций к образованию голографическо го изображения, можно с оговорка ми сказать, что в этом случае и указанных сохраняются и сущест вуют неразрывно только два этапа. Первый остается неизменным так как голографирование осуществляется в когерентном свете для практических случаев расстояние от источника до объекта дс статочно велико, что позволяет считать падающие на объект све товые волны плоскими. Второй этап видоизменяется. В отличи от оптического метода здесь не образуется дифракционное изобра жение; происходит формирование интерференционных структу

в функции от дифракционных порядков первого этапа. Достигается это введением опорной световой волны. Однако, поскольку голограмма формируется на светочувствительном материале конечных размеров, в этом случае имеет место отбор конечного числа дифрагировавших на объекте волн, $\alpha_i \approx H_x/2L$ (рис. 2.6). Что касается третьего этапа, то выполнение его возможно только лишь после восстановления с голограммы картины дифракции на объекте плоской волны источника освещения (т. е. после восстановления с голограммы сигнальной световой волны).

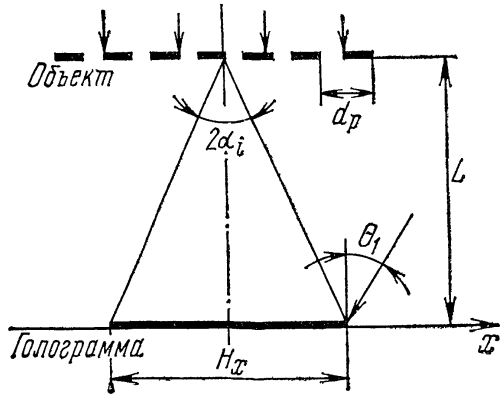


Рис. 2.6. Формирование голограммы

Таким образом, происходит как бы разрыв второго этапа, при котором сохраняется возможность восстановления его с любым временным сдвигом. Изображение (третий этап) должно формироваться обычным способом, т. е. с использованием оптики, но исходным дифракционным полем для этого будет поле, восстановленное с голограммы.

В плоскости голограммы (рис. 2.6, ось y перпендикулярна листу) для каждой отдельно взятой дифрагировавшей на объекте плоской волны может быть написано уравнение распределения освещенности

$$E_i(x,\ y) = e_0^2 + e_i^2 + 2e_0e_i \cos Ax, \qquad (2.13)$$

где e_0 — постоянная амплитуда опорной плоской волны; e_i — постоянная амплитуда i-й дифрагировавшей плоской волны; $Ax = \frac{2\pi x}{\lambda}[\sin\theta_1 - \sin(\theta_2 \pm \alpha_i)]$ — линейно меняющаяся фаза i-й плоской световой волны в плоскости x, y.

Условие максимума освещенности вдоль оси x будет выполняться, если аргумент ур-ния (2.13) $Ax = 2\pi n$ ($n = 0, 1, 2, \ldots$ и т. д.), т. е. максимумы будут в точках

$$x = \frac{\lambda n}{\sin\theta_1 - \sin(\theta_2 \pm \alpha_i)}. \qquad (2.14)$$

При $n = 1$ расстояние между двумя соседними максимумами освещенности

$$d_x = \frac{\lambda}{\sin\theta_1 - \sin(\theta_2 \pm \alpha_i)}. \qquad (2.15)$$

Период следования темных (или светлых) полос равен d_x, а число их, приходящееся на единицу длины, определяется выражением

$$\nu = \frac{1}{d_x} = \frac{\sin\theta_1 - \sin(\theta_2 \pm \alpha_i)}{\lambda}, \qquad (2.16)$$

где ν — пространственная частота следования (в линиях на миллиметр) темных или светлых полос.

Поскольку фотопластинка отбирает некоторое определенное число дифрагировавших волн, то голограмма будет представлять собою зафиксированный результат суперпозиции некоторого конечного числа пространственных частот ν. Причем $\nu_{макс}$ задается условием дифракции на угол $-\alpha_i$, а $\nu_{мин}$ — условием дифракции на угол $+\alpha_i$ относительно угла θ_2 (рис. 2.7.). Угол θ_2, в свою оче-

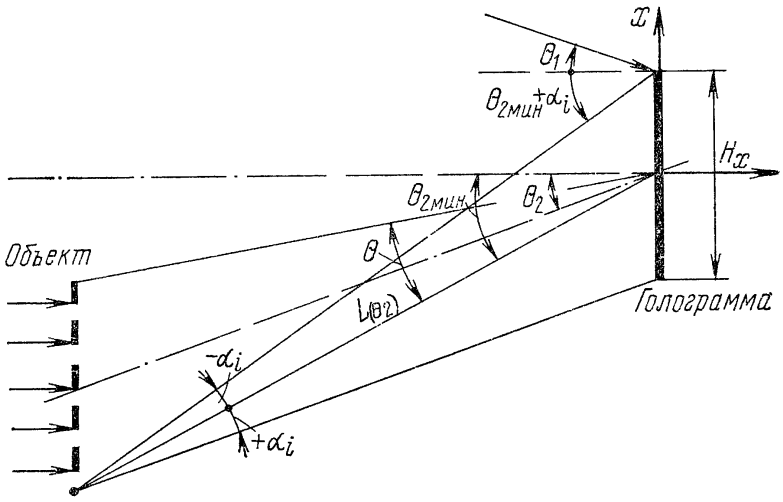


Рис. 2.7. К выводу уравнения максимальной пространственной частоты голограммы

редь, может меняться от $\theta_2=\theta_1$ до $\theta_2=\theta_{2мин}$. Отсюда $\theta_1-\theta_{2мин}=\theta_{гол}$, где $\theta_{гол}$ — угол, под которым видна наиболее удаленная от оси голограммы точка объекта по отношению к опорному источнику. Отсчет углов соответствует правилу знаков [2.2].

Таким образом, для значения пространственной частоты $\nu_{макс}$ выражение (2.16) будет иметь вид

$$\nu_{макс} = \frac{\sin\theta_1 - \sin(\theta_1 - \theta_{гол} - \alpha_i)}{\lambda} \approx \frac{1}{\lambda}\cos\theta_1 \sin(\theta_{гол} + \alpha_i). \quad (2.17)$$

Это выражение показывает, что независимо от того, имеется ли точечный объект, видимый из плоскости x, y под углом $\theta_{гол}$ к опорному источнику, или объект непрерывен и занимает всю видимую под углом $\theta_{гол}$ область, разрешающая способность R материала, на котором фиксируется структура голограммы, должна быть равна $\nu_{макс}$. При этом вдоль оси x на голограмме размером H_x будет зафиксировано

$$Z_x = 2H_x\,\nu_{макс} = \frac{2H_x}{\lambda}\cos\theta_1 \sin(\theta_{гол} + \alpha_i) \quad (2.18)$$

элементов интерференционного поля. Если можно считать, что размер голограммы много меньше размеров объекта, т. е. $\theta_{гол} \gg \alpha_i$, тогда выражение (2.18) упрощается:

$$Z_x \approx \frac{2H_x}{\lambda}\sin\theta_{гол}\cos\theta_1. \quad (2.19)$$

Для удобства сравнения особенностей голографических и оптических систем воспроизведения считаем, что $\theta_1 = \frac{\theta_{гол}}{2}$, тогда

$$Z_x = \frac{2H_x}{\lambda} \sin\theta_{гол} \cos\theta_{гол}/2. \qquad (2.20)$$

Из выражения (2.20) видно, что уменьшение $\cos\theta_{гол}/2$ с ростом $\theta_{гол}$ не приводит к уменьшению Z_x, так как $\cos\theta_{гол}/2$ уменьшается медленнее, чем растет $\sin\theta_{гол}$.

Подсветка голограммы когерентным световым потоком, падающим на нее под углом $\theta'_1 = \theta_1$, позволяет восстановить исходные условия распространения каждой из первоначальных плоских волн, дифрагировавших на объекте и участвовавших в формировании голограммы, а следовательно, и исходную световую волну. Направление распространения действительной световой волны определится из выражения $\sin\theta'_{2(i=+1)} = 2\sin\theta_1 - \sin(\theta_2 \pm \alpha_i)$, а мнимой — из выражения $\sin\theta'_{2(i=-1)} = \sin(\theta_2 \pm \alpha_i)$ (рис. 2.8).

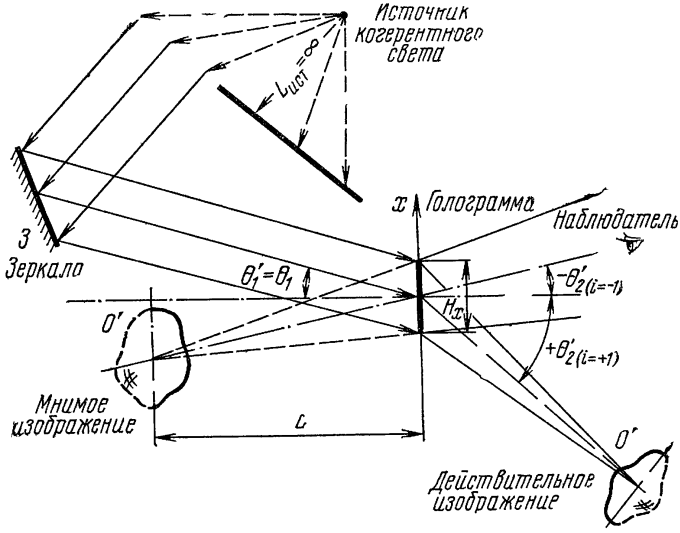


Рис. 2.8. Восстановление световой волны голограммой

Как уже отмечалось, вторичное изображение должно формироваться с помощью оптики, а исходным дифракционным полем будет поле, образованное восстановленными плоскими волнами. Исходя из этого, если объектив, формирующий изображение, способен пропустить все восстановленные первоначальные волны, то в его фокальной плоскости образуется дифракционное изображение источника освещения объекта с числом максимумов, равных числу восстановленных плоских волн. Степень подобия вторичного изображения объекту в этом случае определяется только апертурой голограммы.

Наиболее тонкая регулярная структура на объекте, которая хоть и с наименьшим подобием, но будет отображена в изображении, имеет период

$$d_{p\,\text{мин}} = \frac{\lambda}{\sin \alpha_l} . \tag{2.21}$$

При формировании голограммы эта структура вызвала дифракцию освещающей объект волны на такие углы, что на фотопластинку размером H_x попали плоские волны, соответствующие $i = 0$ и ± 1 порядкам дифракции. Поскольку $\sin \alpha_l \approx \frac{H_x}{2L_{(\theta_2)}} \cos \theta_2$ (рис. 2.7), то

$$d_{\text{мин}} \approx \frac{2\lambda L_{(\theta_2)}}{H_x \cos \theta_2} \tag{2.22}$$

или

$$\Delta\varphi_{\text{гол}} \approx \frac{2\lambda}{H_x \cos \theta_2} , \tag{2.23}$$

где $\Delta\varphi_{\text{гол}}$ — угол, под которым видны из плоскости голограммы детали объекта, отстоящие друг от друга на расстояние $d_{p\,\text{мин}}$.

В фокальной плоскости объектива дифракционное изображение, соответствующее еще разрешаемой регулярной структуре, имеет три максимума. Это, с точки зрения теории Аббе, является необходимым условием формирования вторичного изображения, минимально подобного объекту. Поэтому ур-ния (2.22) и (2.23) определяют разрешающую способность голограммы. Естественно, что если объектив ограничивает число восстановленных с голограммы плоских волн, то степень подобия вторичного изображения объекту будет определяться характеристиками объектива и уменьшится.

Важно отметить то обстоятельство, что может иметь место плохая четкость изображения, несмотря на большую апертуру голограммы и хорошо исправленного объектива. Причина здесь в том, что источник восстанавливающего светового потока может иметь недостаточную пространственную когерентность. Поскольку в фокальной плоскости объектива образуется его дифракционное изображение, а вторичное изображение есть результат интерференции волн, исходящих из дифракционного изображения, недостаточная когерентность источника ухудшит вторичное изображение.

На основании выражения (2.23) требуемое угловое разрешение $\Delta\varphi_{\text{треб}}$ обеспечивает голограмма, размер которой

$$\Delta h = \frac{2\lambda}{\Delta\varphi_{\text{треб}} \cos \theta_2} \tag{2.24}$$

или для $\theta_2 = 0$

$$\Delta h = \frac{2\lambda}{\Delta\varphi_{\text{треб}}} . \tag{2.25}$$

Подставляя Δh из ур-ния (2.24) в ур-ние (2.19), получим зависимость между углом зрения, угловым разрешением и числом элементов, которые необходимо зафиксировать вдоль оси x на голограмме, чтобы при восстановлении изображения обеспечивалось требуемое угловое разрешение его элементов:

$$Z_x \approx \frac{4\sin\theta_{гол}}{\Delta\varphi}. \qquad (2.26)$$

Как было выяснено, современная телевизионная система обеспечивает угловое разрешение деталей объекта $\Delta\varphi \approx 4\operatorname{tg}(\theta/2)/Z$ в некогерентном свете. Подставив это значение в ур-ние (2.26), получим, что для получения такого же разрешения голографическая телевизионная система должна обеспечивать воспроизведение вдоль строки число элементов разложения

$$Z_x \approx \frac{Z\sin\theta_{гол}}{\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}} \qquad (2.27)$$

или для небольших углов зрения θ

$$Z_x \approx 2Z\theta_{гол}/\theta. \qquad (2.28)$$

При формировании голограммы дифрагировавшие на объекте плоские волны помимо интерференции с эталонной волной интерферируют между собой. Результатом этого является наличие на голограмме «паразитных» дифракционных структур. Очевидно, если максимальная пространственная частота «паразитной» составляющей будет равна или больше минимальной пространственной частоты полезной составляющей голограммы, произойдет совпадение порядков дифракции «паразитной» световой волны и восстановленного фронта световой волны. Качество изображения, сформированного из восстановленной световой волны, будет ухудшено.

Дифракционные порядки не перекроются, если выполняется условие:

$$\nu_{макс} \geqslant 2\nu'_{макс}, \qquad (2.29)$$

где $\nu_{макс}$ — максимальная пространственная частота голограммы, определяемая выражением (2.17); $\nu'_{макс}$ — максимальная пространственная частота, определяемая взаимодействием дифрагировавших на объекте волн между собой. Поскольку $\nu'_{макс} = \nu_{макс} - \nu_{мин}$, то при голографировании следует выполнять следующее условие (рис. 2.7):

$$\nu_{макс} \geqslant 2(\nu_{макс} - \nu_{мин}), \qquad (2.30)$$

где $\nu_{мин} = [\sin\theta_1 - \sin(\theta_1 - \theta_{гол} + \theta + \alpha_i)]/\lambda$;

θ — полезный угол зрения голографической системы воспроизведения.

Подставляя значение $\nu_{макс}$ из ур-ния (2.17) и решая неравенство, получим

$$\operatorname{tg}\frac{\theta_{гол}}{2} \geqslant \operatorname{tg}\theta \tag{2.31}$$

или

$$\theta \leqslant \frac{\theta_{гол}}{2}. \tag{2.32}$$

Подставляя значение θ в ур-ние (2.38), получаем $Z_x=4Z$.

Таким образом, для обеспечения в восстанавливаемом изображении точно такого же количества элементов, как в обычной телевизионной системе, в голографической телевизионной системе необходимо обеспечить в четыре раза большее число строк разложения.

Проведенный в предыдущих разделах анализ особенностей образования оптического, телевизионного и голографического изображений позволяет произвести сравнительную оценку информационной емкости плоских одноцветных изображений указанных систем воспроизведения. Использование для этой цели теоремы интерполяции позволяет получить количественный критерии информационной емкости изображений в виде некоторого конечного числа дискретных точек (элементов изображения), освещенность которых известна [2.1, 2.6].

Основываясь на сказанном и используя выражения (2.11) и (2.26), получим уравнение для расчета числа элементов систем воспроизведения в следующем виде:

Для оптической и телевизионной систем

$$N_{эл.тел}=k(Z)^2=\frac{k\cdot 16\cdot \operatorname{tg}^2\theta/2}{\Delta\varphi^2}, \tag{2.33}$$

где $k=b/h$ — формат изображения (h — высота, b — ширина); $\Delta\varphi$ — угловое разрешение его элементов.

При малых углах θ ур-ние (2.33) примет вид

$$N_{эл.тел}\approx k\frac{4\theta^2}{\Delta\varphi^2}. \tag{2.34}$$

Для голографической системы воспроизведения

$$N_{эл.гол}=\frac{Z_x^2}{k}=\frac{16\cdot\sin^2\theta_{гол}}{k\,\Delta\varphi^2}. \tag{2.35}$$

При малых углах $\theta_{гол}$ ур-ние (2.35) примет вид

$$N_{эл.гол}\approx\frac{16\cdot\theta_{гол}^2}{k\,\Delta\varphi^2}=\frac{64\theta^2}{k\,\Delta\varphi^2}. \tag{2.36}$$

Полученные уравнения справедливы для равновероятного наличия черных и белых элементов в изображении, относительный контраст их равен единице.

Сравнивая эти уравнения, видим, что существенной разницы в информационной емкости изображений трех рассматриваемых систем воспроизведения нет. Однако в данном случае простого аналитического сравнения информационной емкости голографического изображения с фотографическим или телевизионным оказывается недостаточно. Необходимо учитывать два очень важных обстоятельства:

1. С голограммы восстанавливается световая волна, а следовательно, и информация об объемности изображения.

2. Условия наблюдения изображения, восстанавливаемого с голограммы, существенно отличаются от наблюдения фото- или телевизионного изображения.

Останавливаясь на первом обстоятельстве, следует сказать, что голограмма всегда несет в себе информацию об объемности изображения. Даже в том случае, когда ограничиваемся только плоскими изображениями, голограмма в восстановленной световой волне обеспечит наличие информации о рельефе материала, из которого сделан объект, и о расположении объекта относительно голограммы и других окружающих его предметов. Это свойство голографического изображения (трехмерность) является важнейшим, именно оно отличает его от изображений других систем воспроизведения. Однако выполнение условия (2.26), когда задано $\varphi = \Delta\varphi_{гл}$, приводит к тому, что размер голограммы должен быть соизмерим с диаметром зрачка глаза человека [ур-ние (2.25)]. Это, в свою очередь, приводит к тому, что при конкретном техническом построении голографической системы воспроизведения второе из указанных выше обстоятельств начинает играть принципиальную роль.

Действительно, голограмма, с которой восстанавливается световая волна, несущая информацию об изображении, является как бы окном, через которое это изображение наблюдается. Если же размер этого окна соизмерим с размером зрачка глаза, то:

до минимума ограничивается поле зрения;

практически исключается возможность восприятия трехмерности изображения, так как невозможно его бинокулярное (т. е. двумя глазами) рассматривание;

исключается возможность рассматривания различных ракурсов изображения.

Иными словами, сводятся на нет все преимущества голографической системы воспроизведения изображений. Чтобы этого избежать, необходимо формировать такие голограммы, линейные размеры которых были бы больше нормального глазного базиса человека $b_0 \approx 65$ мм, что приводит к большой избыточности информации в голограмме.

2.3. Пути сокращения голографической информации

В предыдущем параграфе было показано, что голограмма представляет собой зафиксированную на светочувствительном материа-

ле сложную интерференционную картину вариаций интенсивности светового поля. Частота вариаций определяется условием формирования этой картины и не может быть выше, чем максимальная пространственная частота $\nu_{макс}$ (2.17). При известной площади изотропной голограммы $S_{гол}$ ее информационная емкость

$$N_{эл.гол} = 4\nu^2_{макс} S_{гол}. \qquad (2.37$$

Приравнивая правые части ур-ний (2.37) и (2.35) и решая равенство относительно $\Delta\varphi$, получим

$$\Delta\varphi = \frac{2\sin\theta_{гол}}{\nu_{макс} H_x}. \qquad (2.38)$$

Для примера зададимся $\theta_{гол}=30°$ и $H_x=100$ мм. Значению $\theta_{гол}=30°$ соответствует значение $\nu_{макс}\approx 1000\frac{мин}{мм}$ при $\lambda=0{,}50$ мкм. Тогда из ур-ния (2.38) получаем, что $\Delta\varphi\approx 10^{-5}$.

Данное угловое разрешение элементов изображения в 50 раз выше, чем требует глаз человека. Очевидна избыточность информации для получателя — невооруженного глаза наблюдателя.

Каковы же возможные пути сокращения этой избыточности? При определении их прежде всего следует исходить из конкретных требований, которые наблюдатель предъявляет к голографической системе воспроизведения.

Возможные способы сокращения голографической информации по существу, различаются тем, что тем или иным способом производится обмен между такими свойствами восстановленного с голограммы изображения, как четкость, восприятие объема, величина поля зрения, возможность рассматривания изображения со многих ракурсов и т. д. [2.13 — 2.16]. Основными из них, позволяющими наиболее значительно сократить избыточную голографическую информацию, следует считать такие, как дискретный отбор пространственных частот; использование в схеме голографирования рассеивающей среды. Рассмотрим их несколько подробнее.

Способ дискретного отбора пространственных частот

Способ дискретного отбора пространственных частот заключается в том, что при формировании голограммы на светочувствительной среде производится фиксирование только отдельных участков интерференционной картины вариаций интенсивности светового поля, т. е. формирование элементарных голограмм (рис. 2.9). Размер этих элементарных голограмм и расположение их на светочувствительной среде подчиняется определенному закону. На рис. 2.9*а* показано, например, что элементарные голограммы располагаются дискретно вдоль горизонтальной оси. Размер каждой элементарной голограммы выбирается из условия обеспечения ей определенного углового разрешения элементов объекта, т. е. в соответствии с ур-нием (2.25). В данном случае сокращение голографической информации определяется величиной некоторого ко

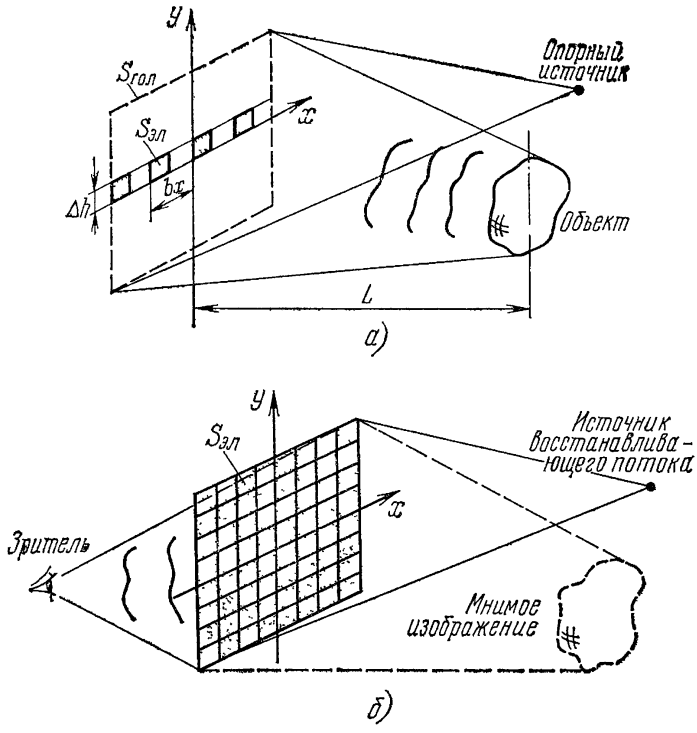


Рис. 2.9. Схема формирования голограммы с уменьшенной информационной емкостью по методу дискретного отбора пространственных частот:
а — запись; *б* — восстановление изображения

эффициента $C_{д.о}$, равного отношению площади светочувствительной среды к суммарной площади элементарных голограмм:

$$C_{д.о} = \frac{S_{гол}}{\sum_{i=1}^{m} S_{эл(i)}} = \frac{S_{гол}}{mS_{эл}}, \qquad (2.39)$$

где m — число элементарных голограмм площадью $S_{эл}$ каждая, зафиксированных на светочувствительном материале площадью $S_{гол}$. Очевидно, что наибольшее значение коэффициента $O_{д.о.макс}$ получится при $m=1$, т. е. когда формируется одна голограмма с размерами, обеспечивающими требуемую разрешающую способность изображения. Оценка информационной емкости такой голограммы произведена в предыдущем параграфе. Здесь следует остановиться несколько более подробно лишь на некоторых особенностях, присущих рассматриваемому методу ограничения количества голографической информации. Если исходить только из требования обеспечить разрешение элементов изображения такое же, каким обладает глаз человека, то величина $S_{эл} \approx 10$ мм^2. Значение коэффициента $C_{д.о.макс}$ при этом может быть величиной 3—5-го порядка и выше (в зависимости от требуемого поля зрения). Естественно, что подобное сокращение голографической информации не может не сопровождаться потерей определенных качественных

свойств изображения, присущих голографическому методу. Основные из них были также названы в предыдущем параграфе. И на основании их можно сделать вывод, что при построении реальной голографической системы воспроизведения будем вынуждены брать существенно меньшее значение коэффициента $C_{д.о}$.

Предположим, что мы сформировали голограмму площадью $S_{гол}$ путем многократного повторения одной и той же элементарной голограммы $S_{эл}$ в вертикальном и горизонтальном направлении ($m=1$). Тем самым обеспечили требуемое поле зрения. Однако трехмерность изображения восприниматься наблюдателем не будет, несмотря на то, что он рассматривает изображение двумя глазами, поскольку отсутствует информация о параллаксе. Следует заметить, что объемность изображения, которая оценивается нами за счет перефокусировки глаза с плана на план (монокулярное зрение), в этом случае сохраняется и воспринимается наблюдателем.

Информацию о параллаксе наблюдатель будет иметь, если сформировать голограмму площадью $S_{гол}$ следующим образом [2.14]: половину ее получить посредством послсдовательного повторения в вертикальном и горизонтальном направлении одной и той же элементарной голограммы $S_{эл}$, а другую половину — посредством такого же последовательного повторения одной и той же элементарной голограммы $S'_{эл}$, полученной на расстоянии $b \approx 65$ мм (глазной базис) по горизонтали от голограммы $S_{эл}$. Голографическая система воспроизведения, построенная с использованием указанного способа, будет эквивалентна стереоскопической системе воспроизведения изображений, однако она обеспечит и монокулярное восприятие объемности изображения, т. е. условия реального рассматривания объекта с одного ракурса.

Если требуется сохранить возможность рассматривания изображения с нескольких ракурсов, то необходимо сформировать голограмму площадью $S_{гол}$ так, чтобы на ее линейном горизонтальном отрезке было расположено с некоторым шагом b_x больше двух ($m>2$) элементарных голограмм $S_{эл}$, соответствующих разным ракурсам. Безынформационные области следует заполнить путем многократного повторения по вертикали и по горизонтали одной и той же элементарной голограммы, соответствующей определенному ракурсу, учитывая, что по горизонтали число повторений должно быть равно $b_x/\sqrt{S_{эл}}$ (рис. 2.9*б*). Очевидно, что при этом $C_{д.о}<C_{д\,о\,макс}$.

В дальнейшем будем называть голограмму, представляющую собой определенного порядка набор одинаковых или разных элементарных голограмм, *синтезированной голограммой*. Из рассмотренного следует, что синтезированная голограмма должна формироваться так, чтобы она содержала минимальный объем голографической информации, необходимый для удовлетворения требований, предъявляемых наблюдателем к голографической системе воспроизведения.

При рассмотрении данного способа сокращения голографической информации была исключена информация о вертикальном параллаксе. Это оправдывается тем обстоятельством, что бинокулярное зрение человека не обеспечивает восприятие вертикального параллакса.

Использование рассеивающей среды

Использование в схеме голографирования рассеивающей среды также позволяет в значительной мере устранить избыточность голографической информации. Сущность этого способа сводится к тому, что сведения об изменениях амплитуды и фазы волнового фронта при сохранении большого заданного поля зрения сосредоточиваются в любой элементарной области некоторого пространства, где и располагается светочувствительная среда [2.17].

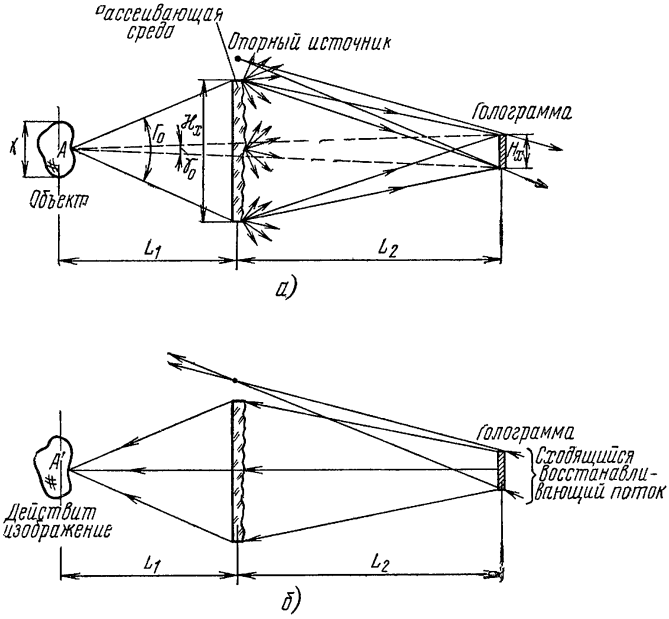


Рис. 2.10. Процесс записи (*а*) и воспроизведения (*б*) изображения с использованием рассеивающей среды

В процессе записи (рис. 2.10*а*) свет, отраженный объектом, попадает на рассеивающую среду, например молочное стекло, размеры которого определяются желаемой величиной поля зрения. Опорный точечной источник устанавливается у рассеивающей среды. Сигнальный волновой фронт, пройдя через рассеивающую среду и претерпев дополнительные амплитудные и фазовые изменения, совместно с опорным волновым фронтом попадает на светочувствительную среду.

Как видно из рисунка 2.10*а*, при отсутствии рассеивающей среды для некоторой произвольно выбранной точки объекта *A* на го-

лограмме зафиксируется конус световых лучей, ограниченных пунктирными линиями. Угол при вершине этого конуса

$$\gamma_0 = 2\operatorname{arc\,tg}\frac{H_x}{2(L_1+L_2)}, \qquad (2.40$$

где H_x — высота светочувствительной среды; L_1 и L_2 — расстояния от объекта до рассеивающей среды и от рассеивающей среды до светочувствительной поверхности соответственно. Поле зрения в этом случае определяется размерами светочувствительной среды. Наличие рассеивающей среды приводит к тому, что световой поток от точки A рассеивается по всем направлениям в пространстве между рассеивателем и светочувствительной средой. Следовательно, информацию о точке A теперь можно получить, находясь в любой точке пространства между рассеивателем и светочувствительной средой. Рассуждая аналогично относительно каждой точки объекта, легко сделать вывод, что в любой точке указанного выше пространства имеем информацию о всех точках объекта. Это обстоятельство означает, что поле зрения теперь будет определяться только размерами рассеивающей среды. Угол при вершине конуса световых лучей, исходящих из точки A и попадающих на рассеиватель,

$$\Gamma_0 = 2\operatorname{arc\,tg}\frac{H_x}{2L_1}, \qquad (2.41)$$

где H_x — высота рассеивателя.

Таким образом, голограмма, сформированная по схеме рис. 2.10*а*, обеспечивает выигрыш в величине поля зрения:

$$\frac{\Gamma_0}{\gamma_0} = \frac{\operatorname{arc\,tg}\frac{H_x}{2L_1}}{\operatorname{arc\,tg}\frac{H_x}{2(L_1+L_2)}} \approx \frac{2(L_1+L_2)}{H_x}\operatorname{arc\,tg}\frac{H_x}{2L_1}. \qquad (2.42)$$

При воспроизведении изображения световой поток направляется на голограмму так, как показано на рис. 2.10*б*. В результате этого с голограммы восстанавливается сопряженный волновой фронт, который, пройдя через рассеиватель в обратном направлении, приобретает такие же амплитудные и фазовые характеристики, как исходный сигнальный волновой фронт, но распространяющийся в противоположном направлении (т. е. сходящийся волновой фронт). Восстанавливается, следовательно, действительное изображение объекта. Если сходящуюся восстановленную световую волну направить непосредственно в глаз наблюдателя, то он воспримет псевдоскопическое (с обращенной объемностью) искаженное изображение. Чтобы можно было видеть изображение так же, как при восстановлении его с обычной голограммы, необходимо найти способы формирования расходящегося волнового фронта.

Возможное сокращение голографической информации в данном случае оценивается как [2.17]:

$$C_{\text{р.с}} = \left(\frac{X}{L_1}\right)^2 = \left(\frac{L_2}{H_x}\right)^2, \qquad (2.43)$$

где X — линейный размер объекта; H_x — высота голограммы.

По данным работы [2.17] экспериментально удалось получить значение $C_{\text{р.с}}=3600$. Однако, если считать, что для голограммы, сформированной по схеме рис. 2.10*а*, остается справедливым условие (2.25), то данный способ позволяет получить значение $C_{\text{р.с}}=L_2^2\Delta\varphi^2_{\text{треб}}/4\lambda^2$. Поскольку в соответствии с ур-нием (2.39) $C_{\text{д.о.макс}}=S_{\text{гол}}\Delta\varphi^2_{\text{треб}}/4\lambda^2$ видно, что при $L_2^2=S_{\text{гол}}$ $C_{\text{р.с}}=C_{\text{д.о.макс}}$ при сохранении всех преимуществ голографического изображения.

Важнейшим фактором, ограничивающим практическое применение метода рассеивающей среды при сокращении голографической информации, является то обстоятельство, что восстановление изображения возможно лишь в том случае, если относительное смещение всех элементов схемы рис. 2.10 не превышает долей световой волны λ за всю длительность цикла: изготовление голограммы —восстановление изображения. Это вытекает непосредственно из того, что световые лучи, выходящие при изготовлении голограммы из точки A объекта, смогут при восстановлении изображения попасть в ту же точку A' пространства, если траектории их прохождения в прямом и обратном направлениях абсолютно совпадают. Это возможно выполнить, если каждый световой луч при восстановлении попадает на тот же самый элемент рассеивателя, на который попадал соответствующий луч при формировании голограммы, и элемент рассеивателя обеспечит его следование по первичной траектории в пространстве действительного изображения.

Рассмотренные способы сокращения голографической информации не являются единственно возможными. Возможно, например, использовать для этой цели увеличение длины волны λ излучения когерентного источника. Голограмму можно сделать с использованием ультразвуковых волн или волн СВЧ диапазона [2.18, 2.19]. При этом с увеличением длины волны λ величина $\nu_{\text{макс}}$ уменьшается обратно пропорционально при постоянном угле зрения [см. ур-ние (2.17)]. Следовательно, пропорционально квадрату максимальной пространственной частоты $\nu^2_{\text{макс}}$ происходит сокращение информационной емкости голограммы. Однако этот метод не является приемлемым для голографических систем воспроизведения изображений, поскольку один и тот же объект по разному отражает световые, ультразвуковые волны и волны СВЧ диапазона.

Таким образом, при анализе возможности построения голографической системы воспроизведения изображений рассмотренные способы сокращения голографической информации в настоящее время следует считать наиболее перспективными. Предпочтение следует отдать способу дискретного отбора пространственных частот, поскольку его практическая реализация представляется более простой, чем реализация способа с рассеивающей средой. В дальнейшем более детально будет рассмотрен только метод дискретного отбора пространственных частот.

3

ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

3.1. Общие вопросы построения голографических телевизионных систем

Заманчивость использования метода восстановления волнового фронта для построения систем воспроизведения изображений, и в частности телевизионных, определяется способностью его обеспечить наблюдателю максимальное приближение к условиям непосредственного рассматривания сюжета. Для прикладных систем наряду с этим, особое значение может иметь то обстоятельство, что информация о сюжете передается в кодированном виде.

Однако практическая реализация голографической телевизионной системы встречает ряд весьма существенных трудностей. Рассмотрим их более подробно, показывая предельные возможности этой реализации, обусловленные современным состоянием техники телевидения и голографии.

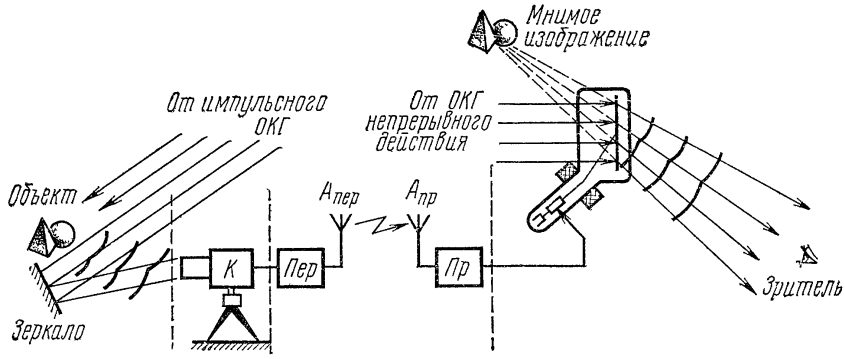


Рис. 3.1. Структурная схема голографической телевизионной системы

На рис. 3.1 приведена структурная схема голографической телевизионной системы [3.1]. Передаваемая сцена освещается либо одним, либо несколькими взаимнокогерентными лазерами. Свет, рассеянный объектами сцены, совместно с опорным лучом попадает на анализирующее устройство голографической телевизионной камеры, в которой картина интерференции световых потоков преобразуется в последовательность электрических сигналов. Последние затем передаются по каналу связи. На экране приемного устройства из электрических сигналов формируется голограмма, ко-

ория при освещении ее лучом лазера восстанавливает передаваемый сюжет.

В гл 2 было показано, что для формирования интерференционной структуры, которая может быть зарегистрирована каким-либо светочувствительным материалом, необходимо выполнить требование временной и пространственной когерентности для опорного и распространяющегося от объекта световых пучков. Единственно возможным способом осуществления этого условия является освещение объектов (сцен) источником когерентного света. Нельзя представить практическое решение этой задачи для сцен практически бесконечно большой протяженности, самосветящихся объектов или освещенных естественным (например солнечным) светом. В связи с этим даже при разработке требуемых источников когерентного излучения задача осуществления внестудийной работы голографических систем воспроизведения становится проблематичной.

Было также показано, что голограмма представляет собой зафиксированную на светочувствительном материале сложную интерференционную картину вариаций интенсивности светового поля. Частота вариаций определяется условиями формирования этой картины и не может быть выше максимальной пространственной частоты $\nu_{макс}$ (2.17). Исходя из этого, разрешающая способность регистрирующей среды R должна быть задана из условия

$$R \geqslant \nu_{макс} \tag{3.1}$$

$$\text{или } \lambda_{мин} R \geqslant \lambda_{мин} \nu_{макс}. \tag{3.2}$$

Значение величины $\lambda_{мин}\nu_{макс}$ можно найти из ур-ния (2.17), которое на основании рис. 2.7 может быть преобразовано к следующему виду:

$$\lambda\nu = \left\{ \sin\theta_1 + \frac{\frac{H_\lambda}{L} + \operatorname{tg}(\theta_{гол} - \theta_1)}{\left\{\left[\frac{H_x}{L} - \operatorname{tg}(\theta_{гол} - \theta_1)\right]^2 + 1\right\}^{1/2}} \right\} \tag{3.3}$$

Перепишем выражение (3.3), приняв $\theta_1 = \theta_{гол}/2$, получим

$$\lambda\nu = \left\{ \sin\frac{\theta_{гол}}{2} + \frac{\frac{H_x}{L} + \operatorname{tg}\frac{\theta_{гол}}{2}}{\left[\left(\frac{H_x}{L} - \operatorname{tg}\frac{\theta_{гол}}{2}\right)^2 + 1\right]^{1/2}} \right\}. \tag{3.4}$$

Уравнение (3.4) представляет собой другую форму записи ур-ния (2.17), которая, однако, позволяет более детально проанализировать требования к разрешающей способности системы голографического воспроизведения изображений.

Рассмотрим четыре возможных случая.

1. Угол $\frac{\theta_{гол}}{2}$ мал $\left(\frac{\theta_{гол}}{2} \leqslant 30°\right)$, тогда можно считать:

а) при $\frac{H_x}{L} \to 0$ $\lambda\nu \approx 2\sin\frac{\theta_{гол}}{2} \approx \theta_{гол}$;

б) при $\frac{H_x}{L} \to \infty$ $\lambda v \approx \sin\frac{\theta_{гол}}{2} + 1$ $\left(\lambda v \to 1, \text{ если } \frac{\theta_{гол}}{2} \to 0\right)$.

2. Угол $\frac{\theta_{гол}}{2}$ достаточно велик $\left(\frac{\theta_{гол}}{2} \to 90°\right)$, тогда

а) при $\frac{H_x}{L} \to 0$ $\lambda v \approx \sin\frac{\theta_{гол}}{2} + 1$ $\left(\lambda v \to 2, \text{ если } \frac{\theta_{гол}}{2} \to 90°\right)$;

б) при $\frac{H_x}{L} \to \infty$ $\lambda v \approx \sin\frac{\theta_{гол}}{2} + 1$ $\left(\lambda v \to 2, \text{ если } \frac{\theta_{гол}}{2} \to 90°\right)$.

Таким образом, в самом общем случае необходимо обеспечить разрешающую способность голографической телевизионной системы, равной $R = \frac{}{\lambda}$. Пусть $\lambda = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ мм, тогда $R \approx 5000$ линий на миллиметр.

Как видно из п. 1*а* и 1*б*, в частных случаях имеется возможность довольно существенного сокращения требований к разрешающей способности голографической системы воспроизведения изображений.

Современные телевизионные системы воспроизведения обладают разрешающей способностью практически на два порядка меньше рассчитанной. Следовательно, необходимо соответствующее ее увеличение. Это, очевидно, является очень сложной задачей хотя бы потому, что требует разрешения технической задачи формирования апертур развертывающих элементов приблизительно на два порядка меньше существующих. Трудности последней задачи по своему характеру приближаются к принципиальным [3.2, 3.9].

Процесс формирования голограммы, требующий определенного времени, в течение которого светочувствительный материал фиксирует структуру интерференционного поля, налагает определенные условия на скорость относительного смещения объектов. Считается [3.3], что четкость интерференционной структуры при формировании сохраняется, если за время экспозиции сдвиг интерференционных полос относительно светочувствительного материала не будет превышать величины $\Delta d = \lambda/4$. Для случая голографирования диффузно-отражающих или диффузно-рассеивающих объектов эта величина уменьшится до значения $\Delta d = \lambda/8$ [3.4]. В реальных сценах объекты редко движутся со скоростью больше 10 м/с. Возможно сделать голограмму такого объекта, если время экспозиции будет $t_{эксп} \leqslant 8$ нс. Это обстоятельство предъявляет определенные требования к источникам когерентного освещения: необходимо использовать импульсные лазеры, мощность которых будет достаточна для обеспечения некоторого заданного значения освещенности фотокатода передающего устройства.

Расчет мощности излучения лазера, проведенный для усредненной минимальной освещенности на фотокатоде, равной 12 лк, дает следующие результаты. Освещенность объектов должна быть порядка 500 лк, мощность в импульсе $1{,}43 \cdot 10^9$ Вт (размер сцены $10 \cdot 10$ м^2). В настоящее время уже разработаны лазеры с указанной мощностью излучения в импульсе при его длительности $\tau_и = 10^{-9}$ с [3.5]. Однако требуется решить задачу существенного увеличения длины когерентности генерируемых ими световых импульсов.

Как было выяснено в гл. 2, воспроизведение в восстанавливаемом изображении заданного количества элементов требует фиксирования на голограмме минимум в 16 раз большего числа элементов, чем при обычном способе воспроизведения [(см. ур-ния (2.34)

и (2.36)]. Это обстоятельство в голографической телевизионной системе должно привести к существенному повышению скоростей развертки. Оно же определяет и требование к полосе пропускания тракта передачи.

Известно [3.6], что требуемая полоса частот канала связи для передачи информации об N элементах изображения

$$\Delta F = \frac{N n_к}{2}, \tag{3.5}$$

где $n_к$ — частота передачи кадров.

Поскольку в соответствии с ур-ниями (2.18) и (2.35) $N_{эл.гол} = \frac{(2\nu_{макс} H_x)^2}{\kappa}$, то, используя выражение (3.4) и учитывая, что $H^2_x/\kappa = S_{гол}$ (площадь голограммы), можно написать:

1. В самом общем случае голографическая телевизионная система потребует полосу канала шириной

$$\Delta F_{гол.т} = \frac{8 \cdot S_{гол} \cdot n_к}{\lambda^2} = \frac{8 S_{гол}}{\lambda^2 T_к}, \tag{3.6}$$

т. е. она будет зависеть только от площади передаваемой голограммы. Приняв, например, $S_{гол} = 10\,000$ мм^2 ($n_к = 25$ кадр/с, $\lambda = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ мм), получим: $\Delta F_{гол\,т} \approx 12 \cdot 10^{12}$ Гц.

2. В частных случаях требуемая полоса пропускания может быть сделана достаточно малой. Например при построении системы воспроизведения с учетом п. 1*а* анализа ур-ния (3.4) (малые углы $\theta_{гол}$) получим

$$\Delta F_{гол.т} \approx \frac{2 S_{гол} \theta^2_{гол} n_к}{\lambda^2} = 2 \cdot S_{гол} \nu^2_{макс} \frac{1}{T_к}. \tag{3.7}$$

Приняв $\theta_{гол} \approx 9°$, для прежних $n_к = \frac{1}{T_к}$ и λ (при $S_{гол} = 1$ мм^2) получим

$$\Delta F_{гол.т} \approx 6{,}5 \text{ МГц} = \Delta F_т.$$

Таким образом, для ряда частных случаев, очевидно, не возникает существенных трудностей по обеспечению требуемой полосы пропускания тракта передачи. Однако в общем случае при передаче голограммы реальных объектов, когда необходимо максимально реализовать преимущества голографического метода воспроизведения изображений, требуется полоса пропускания на много порядков большая стандартной, равной 6,5 МГц.

3.2. Требования к анализирующим устройствам голографических телевизионных систем

Последовательность электрических сигналов, несущих информацию о голографической интерференционной структуре, можно получить либо непосредственным преобразованием изменений интенсивности света в пространстве в электрический сигнал с помощью передающей телевизионной трубки, либо используя прин-

ип «бегущего луча». В последнем случае электрический сигнал пропорционален изменениям коэффициента пропускания (или отражения) светочувствительного материала, на котором предварительно формируется голограмма.

В любом случае для получения коэффициента глубины модуляции сигнала $m \geqslant 0{,}6$ необходимо [3.7] выполнить равенство

$$\rho_{\text{разв.эл}} \leqslant 0{,}5 d_{\text{мин}}, \qquad (3.8$$

где $\rho_{\text{разв.эл}}$ — диаметр развертывающего элемента (анализирующего луча); $d_{\text{мин}}$ — минимальный пространственный период интерференционной картины голограммы.

Диаметр развертывающего элемента с учетом ур-ния (3.4) получается равным:

1. При $\frac{\theta_{\text{гол}}}{2} \leqslant 30°$ и $\frac{H_x}{L} \to 0$ $\rho_{\text{разв.эл}} \leqslant 0{,}5 \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta_{\text{гол}}}{2}} \approx 0{,}5 \frac{\lambda}{\theta_{\text{гол}}}$.

Для $\theta_{\text{гол}} = 60°$ имеем $\rho_{\text{развл.эл}} = \frac{\lambda}{2}$ ($\rho_{\text{развл эл}} = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ мм при $\lambda = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ мм).

2. При больших углах $\left(\frac{\theta_{\text{гол}}}{2}\right) \rho_{\text{разв.эл}} \leqslant 0{,}5 \frac{\lambda}{\sin \frac{\theta_{\text{гол}}}{2} \Rightarrow 1}$.

В пределе $(\theta_{\text{гол}}/2 \to 90°)$ $\rho_{\text{разв.эл}} = \frac{\lambda}{4}$ ($\rho_{\text{разв.эл}} = 0{,}1 \cdot 10^{-3}$ мм при $\lambda = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ мм).

Наименьшая апертура луча в современных промышленных передающих телевизионных трубках составляет $30 \cdot 10^{-3}$—$40 \cdot 10^{-3}$ мм [3.2], что на два порядка больше апертуры, полученной в результате анализа применительно к голографической телевизионной системе ур-ния (3.8). Таким образом, передающие трубки современных телевизионных систем позволяют преобразовывать в электрический сигнал только такие структуры голограмм, наивысшая пространственная частота которых не превышает 15—10 линий на миллиметр. Это соответствует углу $\theta_{\text{гол}} \geqslant 1°$ (рис. 3.2*а*), что резко ограничивает класс голографируемых объектов и в такой же степени все оригинальные свойства голографического метода воспроизведения изображений. Требуется, следовательно, существенное увеличение удельной разрешающей способности передающих трубок для использования их в голографических телевизионных системах.

Наряду с задачей значительного (на два-три порядка) увеличения удельной разрешающей способности анализирующих устройств в целом, следует указать на некоторые дополнительные требования, которые необходимо будет предъявить к светочувствительным поверхностям передающих трубок голографических телевизионных систем:

а) разрешающая способность должна быть выше максимальной пространственной частоты передаваемой голографической структуры;

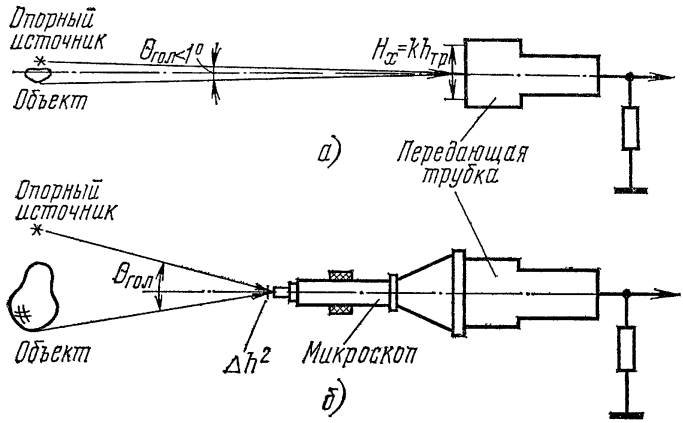


Рис. 3.2. Согласование удельной разрешающей способности передающей трубки с $\nu_{макс}$ интерференционного поля:
а — посредством уменьшения угла $\theta_{гол}$; *б* — посредством дополнительной оптической системы, имеющей линейное увеличение $\beta_0=h_{тр}/\Delta h_{гол}$

б) время фиксирования голографической информации должно быть меньше 8 нс, время ее запоминания (удержания) около 40 мс, время ее стирания — меньше длительности обратного хода луча при смене кадров;

в) они должны выдерживать такое же число циклов запись — запоминание — стирание, какое выдерживают светочувствительные поверхности существующих передающих трубок.

Что касается использования в анализирующих устройствах принципа «бегущий луч», то одним из возможных способов значительного увеличения разрешающей способности телевизионных систем с датчиками такого типа является применение в качестве анализирующего элемента сфокусированного луча лазера [3.8]. Построение телевизионных датчиков с «бегущим лучом» лазера представляется в связи с этим весьма перспективным.

Однако использованию телевизионных датчиков типа «бегущий луч» с отклоняемым лазерным лучом мешает отсутствие [3.9] эффективных способов отклонения этого луча со скоростями, требуемыми в голографическом телевизионном вещании при сохранении высокой разрешающей способности. В настоящее время закончена стадия лабораторной разработки системы, получившей название «лазерный кинескоп» [3.10], которая открывает большие возможности для реализации голографических телевизионных датчиков, построенных по типу «бегущий луч». Следует в связи с этим сказать и о больших открывающихся возможностях реализации телевизионных голографических систем, в основе которых заключен принцип гетеродинного сканирования [3.11].

Итак, было выяснено, что удельная разрешающая способность современных передающих трубок позволяет говорить о построении только таких голографических телевизионных систем, у которых угол между опорным и сигнальным лучами $\theta_{гол}\leqslant 1°$. При

построении такой голографической телевизионной системы производится как бы согласование удельной разрешающей способности передающей трубки с максимальной пространственной частотой голограммы $\nu_{макс}$ так, чтобы удовлетворялось ур-ние (3.1). При выполнении такого согласования можно говорить только лишь о голографировании и передаче информации о микрообъектах или о специальных прикладных случаях телевизионной передачи голографической информации.

Возможно использовать другой способ [2.16] согласования разрешающей способности передающей телевизионной трубки с максимальной пространственной частотой голограммы, при котором не накладывается ограничение на величину угла $\theta_{гол}$. На рис. 3.26 показан данный способ согласования. Передающая трубка снабжается некоторой оптической системой, задача которой — укрупнить пространственную интерференционную структуру до попадания ее на фотокатод. Коэффициент линейного увеличения этой оптической системы должен выбираться из условия

$$\beta_0 \geqslant \frac{\nu_{макс}}{R_{пер.тр}}. \qquad (3.9)$$

Поскольку реальным углам $\theta_{гол}=60°$ соответствует $\nu_{макс}=1600$ лин/мм, то $\beta_0 \geqslant 100$. Следовательно, в качестве оптической системы следует использовать микроскопные объективы. Это последнее обстоятельство накладывает повышенные требования к мощности источника когерентного освещения, поскольку требуется создать некоторую минимальную освещенность фотокатода передающей трубки.

Следует заметить, что число элементов растра передающей трубки (число строк разложения) и в первом и во втором случаях согласования $R_{пер\,тр}$ с $\nu_{макс}$ должно быть найдено, исходя из требуемого углового разрешения элементов объекта, т. е. с использованием ур-ний (2.26) и (2.28).

Все сказанное относительно согласования разрешающей способности передающей трубки с максимальной пространственной частотой голограммы остается справедливым и для случая использования датчика типа «бегущий луч». Разница только в том, что оптическому уменьшению подвергается растр датчика. Этим самым достигается требуемое уменьшение апертуры анализирующего луча. Голограмма при этом никаким оптическим преобразованиям не подвергается.

3.3. Передача голограмм по линиям связи

Возможности сокращения полосы частот канала связи при передаче голограмм

В § 3.1 дано значение требуемой ширины полосы пропускания канала связи для передачи голограмм. Для голограмм реальных объектов возможны следующие решения, непосредственно вытекающие из ур-ния (3.7):

1) обмен полосы на время — способ, пригодный в системах с медленными развертками (неподвижные объекты);

2) уменьшение размеров анализируемого участка голограммы (т. е ее площади) — способ, приводящий к сокращению количества передаваемой информации об объекте.

В первом случае время передачи одной голограммы $T_к$ может быть выбрано до нескольких часов. Размер передаваемой голограммы не ограничивается, но при этом будет передана избыточная информация об объекте. Например избыточная детальность объекта, что не является необходимым с точки зрения невооруженного глаза наблюдателя.

Во втором случае дело обстоит иначе. Этот способ реализуется на основе условия, что восстановленное на приемной стороне изображение будет воспроизводиться с заранее заданным качеством. Тогда, располагая, например, стандартным телевизионным каналом, с $\Delta F_т = 6{,}5$ МГц, производим согласование $v_{макс}$ с $R_{пер.тр}$, подбирая соответствующий коэффициент линейного увеличения оптической насадки на передающую трубку. Однако при этом неизбежно уменьшение площади передаваемой голограммы. На рис. 3.3 в качестве примера приведен график зависимости линейного

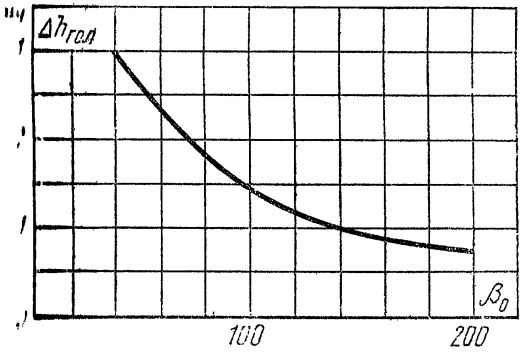


Рис. 3.3. Зависимость линейного размера, наблюдаемого через микроскоп МБР 1А участка голограммы, от коэффициента линейного увеличения

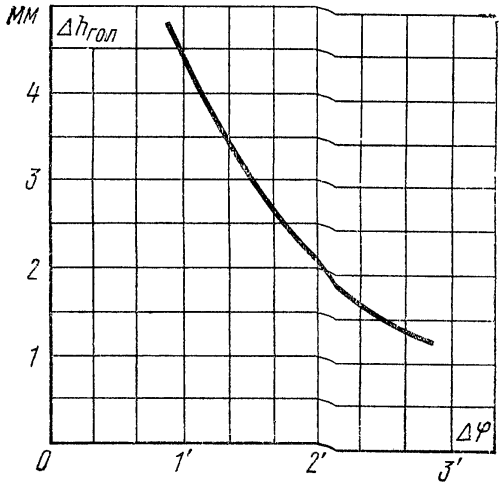


Рис. 3.4. Зависимость линейного размера голограммы от углового разрешения по объекту

размера наблюдаемого через микроскоп типа МБР-1А участка голограммы $\Delta h_{гол}$ от коэффициента линейного увеличения β_0 его оптической системы.

Рассмотрим, каковы будут потери информации при передаче ограниченного участка голограммы $S_{эл} = k(\Delta h_{гол})^2$.

Как уже отмечалось, предельное угловое разрешение невооруженным глазом элементов восстановленного изображения и требуемый для этого линейный размер голограммы связаны между собой дифракционным критерием Аббе. График рис. 3.4 иллюстри-

рует эту связь для $\lambda=0{,}63$ мкм. Из графика видно, что угловое разрешение элементов восстановленного изображения $\Delta\varphi=1'$, необходимое глазу наблюдателя, обеспечивает голограмма с $\Delta h_{\text{гол}}=5$ мм. Следовательно, если по каналу связи будет передана информация о голограмме с площади $S_{\text{эл}}<25$ мм^2, восстановленное на приемной стороне изображение будет содержать меньшее число элементов, чем требует глаз наблюдателя. С этой точки зрения элементарную площадку голограммы $S_{\text{эл}}$ следует, очевидно, выбирать, сообразуясь как с объективными, так и с субъективными факторами, определяющими качество изображения. Оптимизация $S_{\text{эл}}$ должна быть произведена после проведения соответствующих статистических экспериментов.

Оптимальная элементарная площадка голограммы $S_{\text{эл.опт}}$ обеспечит наблюдателю (в среднем) необходимую четкость восстановленного изображения. Однако при этом многие замечательные свойства голографического метода воспроизведения изображений останутся не реализованными:

сведется на нет возможность бинокулярного восприятия объемности изображения;

будет потеряна возможность многоракурсного наблюдения изображения;

снизится помехоустройчивость, так как различного рода помехи или перерывы в передаче информации приведут к уменьшению эффективной площади элементарной голограммы на приемной стороне, а следовательно, к ощутимому снижению качества изображения.

Из перечисленных свойств наиболее важным является возможность бинокулярного восприятия восстанавливаемого изображения. Задача сохранения его при построении голографической телевизионной системы воспроизведения изображений по способу уменьшения размеров анализируемого участка голограммы приобретает принципиальный характер.

Влияние характеристики передачи телевизионной системы на воспроизведение голографических изображений

Предположим, что формируемая на приемной стороне голограмма является чисто амплитудной сложноструктурной дифракционной решеткой. Для обеспечения прямой пропорциональности яркостных соотношений в восстанавливаемом изображении яркостным соотношениям на объекте необходимо обеспечить общий коэффициент нелинейности преобразования интенсивности интерференционного поля $E(x, y)$ в пропускные голограммой интенсивности света $\gamma=2$[2.12]. Это обстоятельство уже вносит специфику в требование к каналу передачи голографической информации. В пределах диапазона передаваемых яркостей общая нелинейность преобразования «свет — сигнал — голограмма» должна носить квадратичный характер. Голограмма, сформированная в приемнике, должна быть позитивна.

В общем случае характер общей нелинейности процессов преобразования «свет — сигнал — голограмма» может весьма существенно отличаться от квадратичного закона и особенно в районах малых и больших освещенностей. Влияние произвольной нелинейности выразится в изменении характера пропускания голограммой интенсивности света, а следовательно, и амплитудного пропускания $T(x, y)$. Это неизбежно должно привести к появлению искажений в восстанавливаемом изображении.

Выходные данные являются функцией входных, претерпевших в процессе преобразований влияние произвольной нелинейности Исходя из этого, оценка влияния нелинейности преобразования на функцию $E(x, y) = e^2_0 + E_1(x, y) = e^2_0 + e^2(x, y) + 2e_0 e(x, y) \cos[ax + \varphi(x, y)]$ позволит оценить влияние ее на амплитудное пропускание голограммы $T(x, y)$, а следовательно, на изображение. Такой подход позволил получить математические результаты для оценки влияния нелинейности фотопроцессов на качество восстановленного изображения [3.12—3.14].

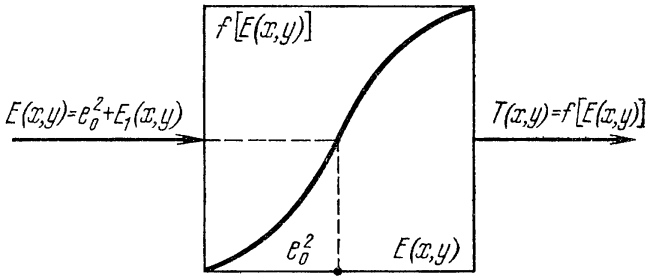


Рис. 3.5. Модель преобразования интенсивности интерференционного поля в амплитудное пропускание голограмм

Схематично модель преобразования интенсивности исходного интерференционного поля в амплитудное пропускание голограммы показана на рис. 3.5. Амплитудное пропускание $T(x, y)$ светомодулятора связано с интенсивностью $E(x, y)$ некоторой произвольной функциональной зависимостью $T(x, y) = f[E(x, y)]$. Из рисунка видно, что если $e^2(x, y)$ (интенсивность сигнальной волны) мала, то используется малый участок кривой $f[E(x, y)]$, и преобразование можно считать линейным. Тогда $T(x, y) = T_0 + A[E_1(x, y)]$, где A — наклон кривой $f[E(x, y)]$ в районе точки e^2_0 (интенсивность опорной волны), и восстановленное изображение будет без искажений.

Функцию $f[E(x, y)]$ можно разложить в ряд Фурье по компонентам $\cos[ax + \varphi(x, y)]$:

$$f[E(x,y)] = \sum_{m=0}^{m=\infty} T_m\left[\frac{e(x,y)}{e_0}\right] \cos[ax + \varphi(x, y)], \qquad (3.10)$$

где $T_m\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]$ — коэффициенты Фурье; e_0 и $e(x, y)$ — амплитуды опорной и сигнальной волн соответственно;

$$a = \frac{2\pi x}{\lambda} \sin\theta_1.$$

Условием неискаженного воспроизведения восстанавливаемого с голограммы изображения является наличие в выражении (3.10)

члена, прямо пропорционального $\frac{e(x, y)}{e_0}\cos[ax+\varphi(x, y)]$. Если имеются члены не в прямой пропорциональной зависимости с этим выражением, то они и определят искажение при восстановлении. Наличие в выражении (3.10) членов, для которых $m>1$, определяет появление высших порядков дифракции, которые эффективно отделяются от полезного изображения и не мешают при наблюдении.

Таким образом, для интересующих нас коэффициентов Фурье при $m=1$ можно написать

$$T_1\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f\left\{e_0^2+e_0^2\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]^2+\right.$$

$$\left.+2e_0^2\left[\frac{e(xy)}{e_0}\right]\cos[ax+\varphi(xy)]\right\}\cos[ax+\varphi(x, y)]\,d[ax+\varphi(xy)]. \quad (3.11)$$

Решением ур-ния (3.11) является выражение

$$T_1\left[\frac{e(xy)}{e_0}\right]=2\sum_{n=0}^{n=\infty}\frac{f^{(2n+1)}\left\{e_0^2+e_0^2\left[\frac{e(xy)}{e_0}\right]^2\right\}\left\{e_0^2\left[\frac{e(xy)}{e_0}\right]\right\}^{2n+1}}{n!\,(n+1)!}. \quad (3.12)$$

Выражение (3.12) удобно представить в виде степенного ряда $\frac{e(xy)}{e_0}$. Для этого следует разложить в ряд Тейлора аргумент каждой $(2n+1)$-й производной. Выполнив эту операцию и ограничив ряд первыми двумя членами, получим

$$T_1\left[\frac{e(xy)}{e_0}\right]=2e_0^2 f^{(1)}(e_0^2)\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]+[2e_0^4 f^{(\prime\prime)}(e_0^2)+e_0^6 f^{(\prime\prime\prime)}(e_0^2)\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]^3+\ldots \quad (3.13)$$

Полученное выражение позволяет оценить влияние любого закона преобразования «интенсивность интерференционного поля — амплитудное пропускание сформированной голограммы» на качество изображения. Так, если $f[E(x, y)]=kE(x, y)$, то из (3.13) получаем

$$T_1\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]=2k(e_0^2)\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right], \quad (3.14)$$

т. е. с точностью до постоянного множителя восстановление амплитудных соотношений в восстанавливаемой световой волне по отношению к световой волне, распространяющейся от объекта. В любом другом случае пропорциональность восстановления амплитудных соотношений световой волны не сохраняется, кроме того, полезная амплитудная составляющая световой волны суммируется с мешающей, проявление которой на изображении имеет место в виде фона, ухудшающего контраст.

Весьма интересным является результат, получаемый при $f[E(x, y)]=\log kE(x, y)$. При этом $T_1\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]=2\frac{e(x, y)}{e_0}$ и искажение отсутствует, хотя практически передаются только две градации яркости.

Отношение полезной и паразитной составляющих в амплитуде восстанавливаемой световой волны

$$P=\frac{2k\left(e_0^2\right)\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]}{2\left(e_0^2\right)\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]\left[f^{(')}\left(e_2^0\right)-k\right]+\left[2\left(e_0^4\right)f^{(")}\left(e_0^2\right)+\left(e_0^6\right)f^{(''')}\left(e_0^2\right)\right]\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]^3}. \tag{3.15}$$

Анализируя это выражение, можно сказать, что имеются по крайней мере три условия получения отношения $P\to\infty$:

1) строго квадратичный закон преобразования распределения интенсивности (интерференционного поля в плоскости анализирующего устройства) в распределение пропускания света голограммой на приемной стороне:

$$f^{(')}\left(e_0^2\right)-k=0,\ f^{(")}\left(e_0^2\right)=0,\ f^{(''')}\left(e_0^2\right)=0;$$

2) выбор соотношения $\frac{e(xy)}{e_0}<1$, когда получаем $\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]^3\ll 1$;

3) введение очень большой нелинейности вида $f[E(x,y)]=\log kE(x,y)$.

Использование в канале связи γ-коррекции открывает возможности довольно точного выполнения условия квадратичности в некотором диапазоне анализируемых интенсивностей интерференционного поля. Следовательно, в этом диапазоне не будет нарушено условие линейности восстановления амплитуды световой волны. Для интенсивностей интерференционного поля, которые выходят за указанный диапазон, условие квадратичности их преобразования не выполняется, следовательно, будет иметь место ограничение диапазона передаваемых интенсивностей.

Предельное уменьшение интенсивности воспроизводимых деталей по сравнению с их яркостью на объекте можно оценить как отношение линейного восстановления к двухградационному:

$$S=\left\{\frac{2k\left(e_0^2\right)\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]}{2\left[\frac{e(x, y)}{e_0}\right]}\right\}^2=k^2e_0^4. \tag{3.16}$$

При выполнении условия двухградационной передачи информации о структуре голограммы имеет место удаление всех вариаций контрастности голограммы вследствие одинакового ограничения всех ее элементарных дифракционных составляющих. Яркость каждой восстановленной точки изображения будет минимально возможной, но относительная их яркость должна сохраняться неизменной, т. е. полностью восстанавливается динамический диапа-

зон яркостей объекта. Это, безусловно, идеальный случай. Реально же наибольшему искажению в случае двухградационной передачи голограммы могут подвергнуться разные дифракционные решетки (составляющие голограммы) — как соответствующие наиболее ярким, так и наименее ярким точкам объекта. В результате этого относительная яркость восстанавливаемых элементов изображения может быть нарушена. Экспериментальное подтверждение этого описано в [3.15]. В ней демонстрируется возможность получения наименьшей восстанавливаемой яркости в тех участках восстанавливаемого изображения, которые на объекте имели наибольшую яркость, т. е. негативное их восстановление по отношению к участкам, которые на объекте менее ярки. Результаты получены при условии, что $e^2(x,y) \ll e^2_0$.

Голография исключает возможность фиксации и воспроизведения информации о самосветящихся объектах из-за необходимости выполнения требования когерентности. Поэтому в большинстве случаев, если искусственно не уменьшается интенсивность опорного потока, справедливо условие $e^2_0 > e^2(x,y)$. Значения максимальной и минимальной интенсивностей интерференционного поля в плоскости анализирующего устройства, которые еще будут переданы, определяется максимально и минимально допустимыми освещенностями светочувствительного слоя (например, фотокатода) соответственно. Естественно, что этот диапазон передаваемых интенсивностей не должен дополнительно ограничиваться в канале связи и в приемном устройстве. Таким образом, при известном типе анализирующего устройства $E_{макс}$ и $E_{мин}$ известны (максимально и минимально-допустимые освещенности фотокатода или фотопроводящего слоя). Тогда

$$e_0^2 = \frac{E_{макс} + E_{мин}}{2} \quad \text{и} \quad e^2(x,\ y) \leqslant \frac{E_{макс} - E_{мин}}{2}.$$

Глубина модуляции интенсивности интерференционных полос в плоскости фотокатода

$$m = \frac{E_{макс} - E_{мин}}{E_{макс} + E_{мин}}. \tag{3.17}$$

Для когерентного света $E_{макс} = [e_0 + e(x,\ y)]^2$; $E_{мин} = [e_0 - e(x,\ y)]^2$,

т. е,

$$m = \frac{2\dfrac{e(x,\ y)}{e_0}}{1 + \left[\dfrac{e(x,\ y)}{e_0}\right]^2}. \tag{3.18}$$

На рис. 3.6 приведен график зависимости $m = f\left[\dfrac{e(x,\ y)}{e_0}\right]^2$.

Из выражения (3.18) видно, что глубина модуляции интенсивности интерференционных полос будет максимальна ($m = 1$), если $\dfrac{e^2(x,y)}{e_0^2} = 1$. При $\dfrac{e^2(x,y)}{e_0^2} \ll 1$ выражение (3.18) приводится к ви-

ду: $m = 2\frac{e(x,y)}{e_0}$, а при $\frac{e^2(x,y)}{e_0} \gg 1$, оно имеет вид: $m = 2\frac{e_0}{e(x,y)}$.

Глубина модуляции интенсивности $m \to 0$, когда отношение $\frac{e(x,y)}{e_0}$ и много меньше и много больше единицы.

При неискаженном воспроизведении голографического изображения интенсивность восстановленной световой волны пропорциональна квадрату амплитудного пропускания голограммы [см. ур-ние (3.14)]. Если соблюдается условие $\frac{e^2(x,y)}{e_0^2} \ll 1$, то из сравнения ур-ний (3.14) и (3.18) видно, что интенсивность восстановленной световой волны фактически пропорциональна квадрату глу-

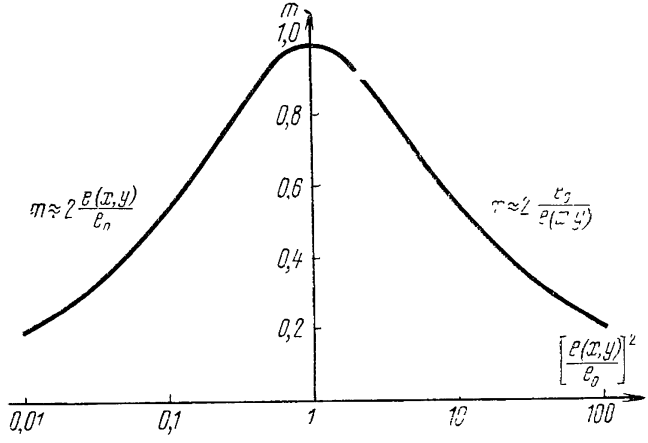


Рис. 3.6. Зависимость глубины модуляции интерференционного поля от соотношения интенсивности опорного и сигнального световых пучков

бины модуляции интенсивности интерференционных полос. Исходя из этого, отношение $\frac{e^2(x,y)}{e_0^2}$ следует брать по возможности меньшим, чтобы исключить влияние градационных искажений восстановленного изображения. Практически оно выбирается в пределах 1/3—1/10 [3.4, 3.16]; $m \approx 0{,}87 \div 0{,}58$. Однако надо помнить, что при этом уменьшается яркость восстанавливаемого изображения.

Относительный контраст голограммы K связан с глубиной модуляции интенсивности интерференционного поля соотношением

$$K = \frac{2m}{m+1}. \qquad (3.19)$$

При значениях $m = 0{,}87 \div 0{,}58$ получим $K = 0{,}93 \div 0{,}74$. «Нормальная» телевизионная система может обеспечить воспроизведение передаваемых стопроцентно контрастных штриховых структур с периодом штрихов $d \approx 2\rho_{\text{разв эл}}$ (перпендикулярных направлению развертки строки):

при бесконечной полосе пропускания канала с относительным контрастом $K'=0{,}67$;

при ограниченной полосе пропускания канала с относительным контрастом $K'=0{,}4$ [2.8]. Отсюда, если максимальную пространственную частоту увеличенной голограммы задать равной $\nu_{макс}=\frac{Z}{2H_y}$, то при указанных выше значениях отношения $\frac{e^2(x,y)}{e_0^2}$ яркость восстанавливаемого в приемнике изображения будет всегда меньше возможной. Уменьшение ее пропорционально отношению квадратов глубины модуляции интенсивности интерференционных полос и глубины модуляции структуры голограммы, сформированной в приемнике:

$$\left(\frac{m}{m'}\right)^2=\left[\frac{K(2-K')}{K'(2-K)}\right]^2. \qquad (3.20)$$

При $K=0{,}74$ и неограниченной полосе пропускания телевизионная система воспроизведет $\nu_{макс}$ с относительным контрастом $K'<0{,}67$, т. е. отношение (3.20) будет всегда больше трех. Если полоса пропускания ограничена, то оно будет всегда больше десяти. Современная телевизионная система обеспечивает в мелких деталях относительный контраст $K'\approx 0{,}2$, тогда отношение (3.20) будет около пятидесяти.

Эти обстоятельства позволяют сделать вывод, что при телевизионном методе передачи голографической информации спадающая частотно-контрастная характеристика системы должна привести к уменьшению яркости в восстанавливаемом изображении в направлении увеличения угла $\theta_{гол}$. Эта неравномерность яркости изображения может достигать больших величин, если система передает максимальные пространственные частоты с контрастом, достаточным лишь для их разрешения. Исходя из этого, двухградационная передача информации о структуре голограммы может оказаться предпочтительней. Она позволит сохранить требуемую равномерность распределения яркости в изображении, но при пониженной яркости [3.21, 3.22].

Экспериментальные результаты передачи голограмм по каналам связи

Проведенные эксперименты по передаче голограмм по каналам связи позволили выяснить конкретные возможности современной техники передачи изображений применительно к использованию голографического метода [3.17—3.22]. Результаты экспериментов по передаче голограмм по замкнутому телевизионному каналу полосой 6,5 МГц, проведенных кафедрой телевидения ЛЭИС им. профессора М. А. Бонч-Бруевича, представлены на рис. 3.7—3.9. Приведенные рисунки соответствуют трем узловым стадиям эксперимента по передаче голограмм следующих объектов:

транспаранта, представляющего собой вырезанную на непрозрачной основе звезду с буквами ТЛ в центре, подсветка которого производилась диффузно-направленным освещением (матовое стекло) (рис. 3.7);

транспаранта, представляющего собой вырезанные на непрозрачной основе буквы ЛЭИС ТВ, подсветка которого производилась диффузным освещением (молочное стекло) (рис. 3.8);

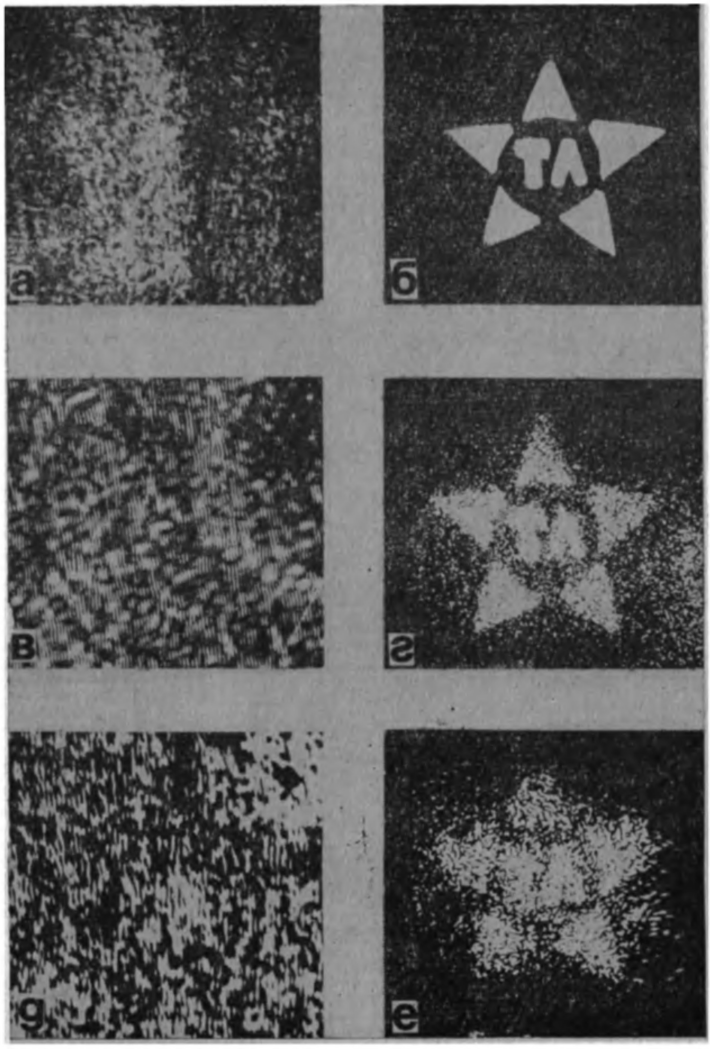


Рис. 3.7. Результаты оптического преобразования и передачи по телевизионному каналу голограммы плоского объекта «Звезда»

сцены из трехмерных диффузно-рассеивающих объектов (рис. 3.9).

Рисунки 3.7—3.9*а* и *б* представляют голограмму объекта и восстановленное с нее изображение; *в* и *г* — участок увеличенной структуры предыдущей голограммы и восстановленное с этого участка изображение.

Сравнение изображений рисунков *б* и *г* показывает, что они существенно отличаются по качеству. Объясняется это, прежде всего, резким сокращением количества голографической информации вследствие того, что входное отверстие микроскопа, увеличивающего (укрупняющего) структуру голограммы, существенно ограничивает используемую площадь интерференционного голографического поля. Результирующий участок голографического поля при восстановлении изображения фактически содержал в среднем 1000 элементов вдоль горизонтальной оси голограммы, что согласно ур-нию (2.26) обеспечивает угловое разрешение элементов восстанавливаемого изображения $\Delta\varphi = 4'$.

Рисунки *д* и *е* представляют результаты передачи увеличенных голограмм по телевизионному тракту и восстановленные изображения с голограмм, сфотографированных с экрана видеоконтрольного устройства ВК-133. Последнее работает на кинескопе 47ЛК2Б, разрешающем 1000 телевизионных строк.

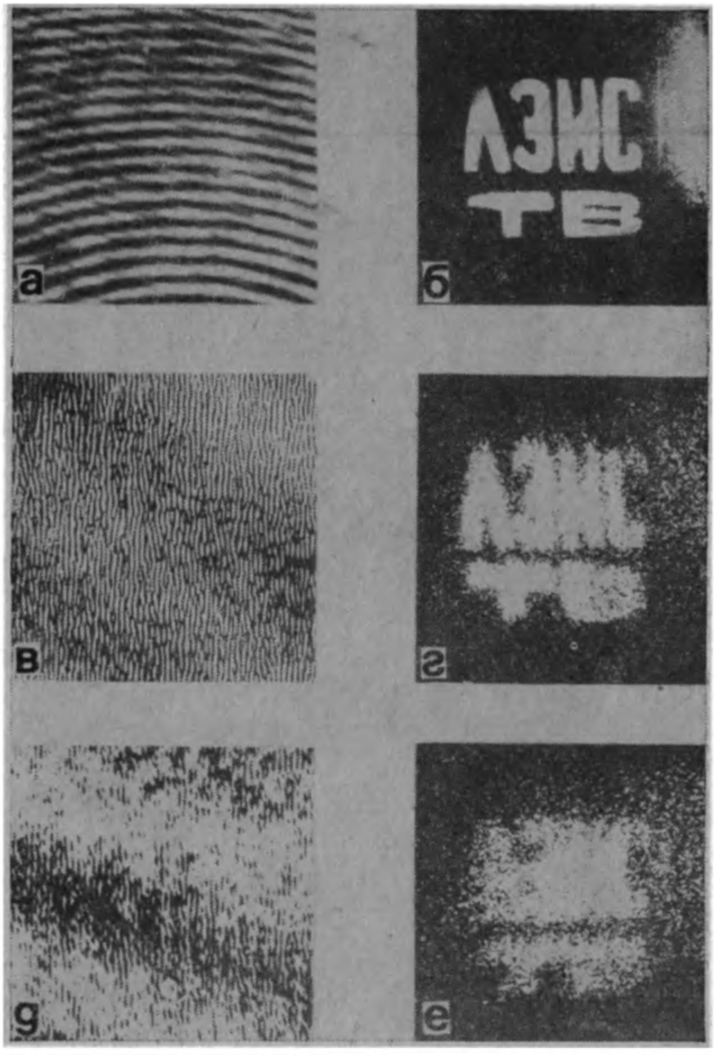


Рис. 3.8. Результаты оптического преобразования и передачи по телевизионному каналу голограммы плоского объекта «ЛЭИС — ТВ».

Сравнение изображений *е* и *г* показывает, что имеет место дальнейшее снижение качества восстанавливаемого изображения. Причина этого в том, что при передаче по стандартному телевизионному каналу максимальное число элементов голографической структуры, используемой при восстановлении изображения, не может быть больше, чем число элементов разложения. Поскольку вдоль строки система разрешала 600 элементов, среднее значение разрешаемого угла $\Delta\varphi$ должно увеличиться до $\Delta\varphi \approx 10'$. На качестве изображения сказалась также неравномерность разрешения от центра к краям растра, что определило дополнительное уменьшение числа элементов структуры голограммы, участвующих в формировании изображения, а следовательно, дополнительное ухудшение углового разрешения элементов изображения.

Не смотря на ожидаемый приблизительно одинаковый качественный результат, восстановленные с передаваемых голограмм изображения различных объектов отличаются друг от друга. Имеет место дополнительное ухудшение качества изображения с увеличением сложности объекта и изменением характера диффузно-рассеивающей подсветки. Отмеченное ухудшение качества, проявляющееся главным образом в уменьшении яркости и четкости наиболее удален-

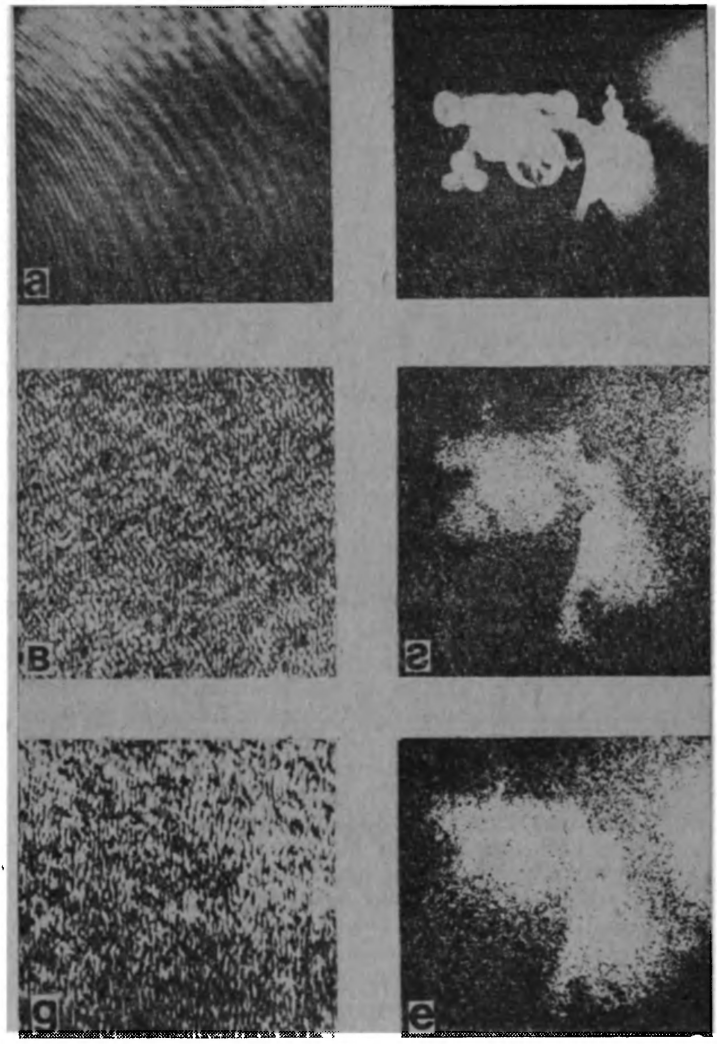


Рис. 3.9. Результаты оптического преобразования и передачи по телевизионному каналу голограммы объемной сцены «Пушка и Колокол»

ных от восстанавливающего пучка элементов изображения, является, по всей видимости, следствием нестабильности чересстрочной развертки. Это последнее обстоятельство неизбежно должно привести к сглаживанию искривленной структуры голограммы, т. е. потере наиболее высоких пространственных частот. Действительно, если голограмму представить как «набор» горизонтальных и вертикальных дифракционных структур соответствующих пространственных частот, то нестабильность чересстрочной развертки приводит к понижению вертикальной разрешающей способности, т. е. потере высокочастотных горизонтальных компонентов голограммы. При этом структура голограммы, ответственная за восстановление наиболее удаленных от восстанавливающего потока точек изображения, искажается. Для объектов типа транспарант, освещаемых направленным опорным потоком, горизонтальные пространственные частоты, как правило, довольно низки. Они увеличиваются с введением диффузно-рассеивающей подсветки и по мере усложнения объекта. Именно поэтому наиболее характерно искажения проявляются на последнем изображении.

На качество изображения, безусловно, влияет наличие паразитных структур на увеличенной голограмме, которые являются результатом дефектов оп-

тики, зернистости структуры фотоматериала, многократности фотообработки, фиксирования на принятой голограмме шумов видеоканала. Паразитные структуры приводят к появлению низкочастотной паразитной дифракции света. При увеличении структуры голограммы создаются такие условия восстановления изображения, при которых оно воспроизводится на фоне этой паразитной дифракции. Вследствие этого происходит понижение контраста изображения.

Результаты эксперимента полностью подтверждают теоретический вывод, данный в гл. 2 (см. § 2.2), о необходимости увеличения объема передаваемой информации в голографической телевизионной системе по сравнению с существующей, если требуется воспроизвести одинаковое число элементов в изображении. Передача голограмм по стандартному телевизионному каналу показала также, что возможности воспроизведения в этом случае изображений объектов с большими угловыми размерами (при сохранении требуемой четкости) существенно ограничены. Поэтому в качестве продолжения и развития описанных выше экспериментов была произведена передача голографической информации по фототелеграфному каналу связи.

Фототелеграфная аппаратура «Нева» позволяет передать по каналу связи с полосой пропускания $\Delta F=3$ кГц за 12,5 мин увеличенную голограмму размером 200×300 мм. Наивысшая пространственная частота, еще разрешаемая этой аппаратурой, равна приблизительно 2,5 лин/мм. Это соответствует стандарту телевизионного разложения 1000 строк, а вдоль строки разрешается 1500 элементов. Иначе говоря, при использовании аппаратуры типа «Нева» нельзя ожидать существенно лучших результатов, чем в проведенном эксперименте передачи голограмм по стандартному телевизионному каналу [3.21].

Гораздо большими возможностями обладает аппаратура, предназначенная для передачи газетных полос и других штриховых изображений. Она позволяет передать по каналу связи с полосой пропускания $\Delta F=240$ кГц за 12 мин увеличенную голограмму размером 420×600 мм. Наивысшая пространственная частота, разрешаемая аппаратурой, равна 15 лин/мм. Это соответствует стандарту телевизионного разложения 12 600 строк при разрешаемых вдоль строки 18 000 элементах. С использованием этой аппаратуры и производилась передача голограмм по фототелеграфному каналу Москва — Минск [3.22].

На барабан аппаратуры были уложены два фотоотпечатка увеличенных голограмм размером 180×240 мм и три фотоотпечатка увеличенных голограмм размером 120×180 мм (рис. 3.10*а*). Результаты эксперимента приведены на рис. 3.10*б*, *в*, *г*, *д*: *б* — участок увеличенной голограммы; *г* — восстановленное с полной увеличенной голограммы изображение до передачи; *в* — участок увеличенной голограммы; *д* — восстановленное с полной увеличенной голограммы изображение после передачи.

Из сравнения рис. 3.10*г* и *д* видно, что качество изображения до и после передачи остается практически неизменным. Однако оно ниже ожидаемого. Действительно, в соответствии с ур-нием (2.26), разрешаемый угол должен равняться в среднем $\Delta\varphi\approx20''$, но этого не наблюдается. На рис. 3.11 показаны результаты восстановления изображений с участков увеличенной голограммы: *а* — до передачи и *б* — после передачи. Размеры этих участков были существенно меньше размеров исходной увеличенной голограммы. Сравнение этих изображений с изображениями рис. 3.10*г* и *д* показывает, что ухудшается только шумовая характеристика восстановления, четкость же изображений становится лучше. Указанное улучшение четкости изображения является следствием уменьшения аберраций оптической части системы восстановления.

На рис. 3.11*в* показано изображение, восстановленное с голограммы, которая была оптически уменьшена хорошо исправленной системой. Ее максимальная пространственная частота отличалась от структуры исходного голографического поля приблизительно в два раза. Видно, что четкость изображения по сравнению с четкостью изображений рис. 3.10 улучшается. Это подтверждает сделанный вывод о том, что при восстановлении изображения со всей увеличенной голограммы необходимо использовать оптическую систему с возможно меньшими аберрациями, так как сама голограмма сохраняет возможность обеспечить высокое разрешение элементов изображения.

Аппаратура для передачи газетных полос не передает полутонов изображений, поэтому все переданные голограммы — двухградационные. Практически это

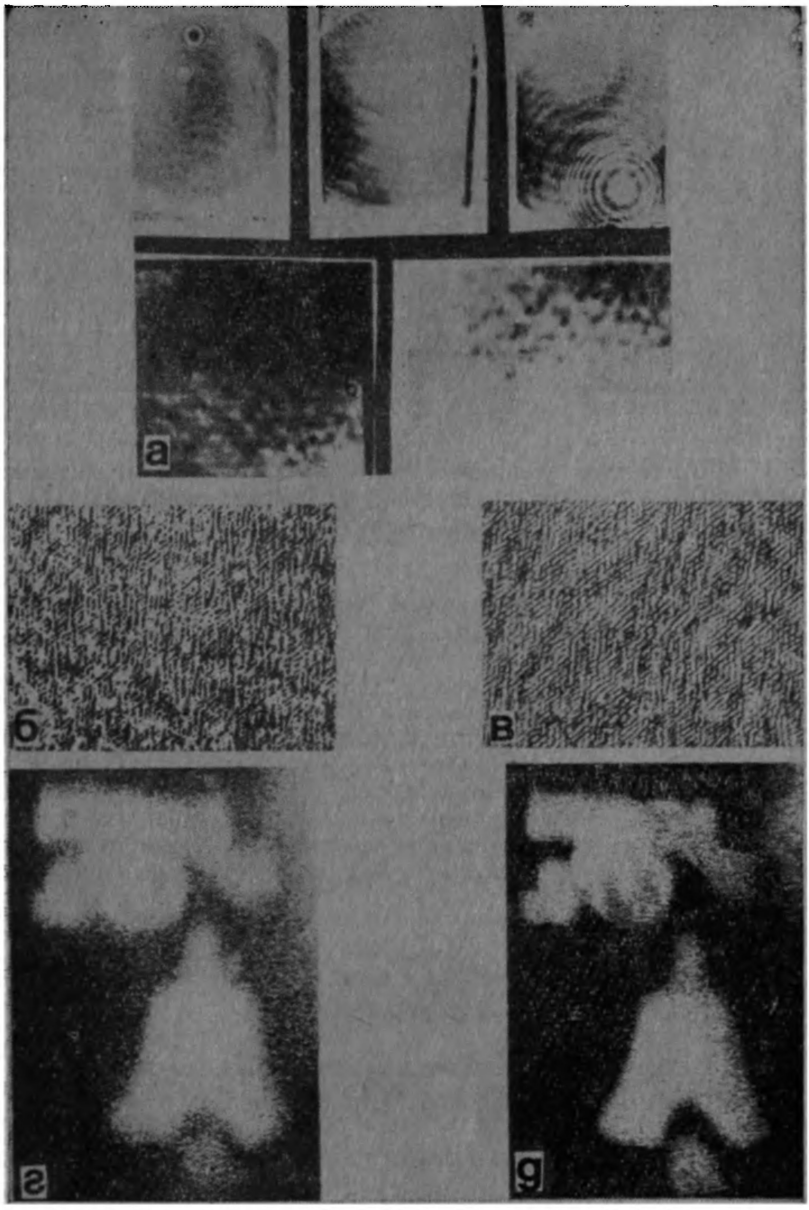


Рис. 3.10. Результаты передачи по фототелеграфному каналу увеличенной голограммы объемной сцены «Пушка и Колокол» (большой участок голограммы)

же имело место и при проведении экспериментов по передаче голограмм по замкнутому телевизионному каналу. При восстановлении изображений это привело к появлению достаточно интенсивных высших порядков дифракции.

В целом эксперименты показали, что основным фактором, ограничивающим качество изображения, восстанавливаемого с переданного по стандартному телевизионному каналу голограммы, является недостаточное число строк разложения. В этом случае можно передать объем голографической информации, достаточной лишь для воспроизведения одного ракурса изображения при неудовлетворительной четкости.

Фототелеграфные системы, в которых число строк разложения может быть существенно больше, позволяют передать или один большой участок голограм-

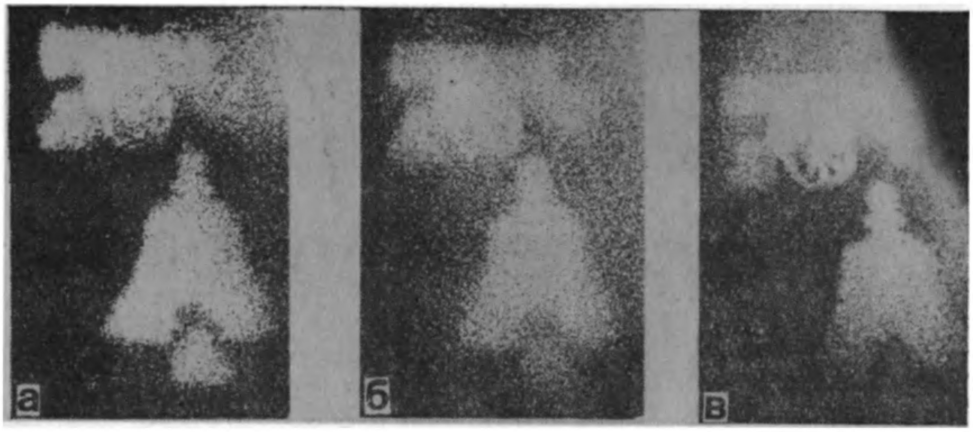


Рис. 3.11. Результаты воспроизведения изображений с переданной по фототелеграфному каналу голограммы объемной сцены «Пушка и Колокол»

мы, или несколько малых произвольно выбранных участков, несущих информацию о разных ракурсах объекта. При этом сохраняется заданная четкость изображения.

Принятая увеличенная голограмма должна быть уменьшена так, чтобы ее максимальная пространственная частота была по возможности ближе к максимальной пространственной частоте исходной голографической структуры. Это позволяет восстанавливать изображение с четкостью, определяемой размером передаваемого участка (с точностью до аберраций самой голограммы). В противном случае восстановление изображения с увеличенной голограммы необходимо производить в сходящемся световом потоке и четкость его определяется параметрами (аберрациями) оптической системы, формирующей восстанавливающий световой поток.

3.4. Воспроизведение голограмм с помощью телевидения

Возможность использования современных телевизионных систем для воспроизведения голографических изображений

В современной телевизионной системе удельная разрешающая способность передающего и приемного устройств не играет принципиально важной роли. Увеличение размера изображения при постоянном числе его элементов приводит лишь к необходимости увеличивать расстояние рассматривания. В § 3.2 было показано, что метод согласования структуры голографического поля с удельной разрешающей способностью передающего устройства позволяет существенно упростить задачу обеспечения высокой удельной разрешающей способности голографической телевизионной системы на передающей стороне. Иначе дело обстоит на приемной стороне этой системы.

Восстановление реальных условий рассматривания объемного изображения возможно в том случае, если структура голограммы, сформированной в приемнике, в масштабе равна структуре исходного интерференционного поля. Иначе говоря, удельная разре-

шающая способность приемного устройства голографической телевизионной системы должна быть равна $\nu_{макс}$ исходного интерференционного поля. Если это условие не выполняется, происходит изменение масштаба восстановленного изображения. Соотношение (2.17) для этого случая принимает вид

$$\nu_{макс\ уг} = \frac{1}{d_{мин.уг}} = \frac{1}{\lambda} \sin(\theta_{уг} \pm \alpha_{iуг}) \cos\theta_{1уг}. \qquad (3.21)$$

Поскольку отношение $\nu_{макс}/\nu_{макс\ уг} = \beta$ — результирующее линейное увеличение структуры исходного голографического поля, полученное в результате оптического согласования и телевизионной передачи, то можно написать

$$\beta = \frac{\cos\theta_1 \sin(\theta_{гол} \pm \alpha_i)}{\cos\theta_{1уг} \sin(\theta_{уг} \pm \alpha_{iуг})}. \qquad (3.22)$$

Если $L \gg H_x$ и $\theta_1 = \theta_{гол}/2$, ур-ние (3.22) принимает вид

$$\beta = \frac{\cos^2\theta_{гол}/2 \cdot \sin\theta_{гол}/2}{\sin\theta_{уг}/2}. \qquad (3.23)$$

Учитывая, что $\sin\theta_{гол}/2 = B_x/2L$, где B_x — размер объекта, и $\cos^2\theta_{гол}/2 \approx 1$ (для не очень больших углов), получим

$$\beta \approx \frac{B_x}{L\theta_{уг}} = \frac{L_{уг}}{L}, \qquad (3.24)$$

т. е. изображение наблюдается от плоскости голограммы на расстоянии $L_{уг}$, которое пропорционально линейному увеличению β. Таким образом, масштаб наблюдаемого изображения будет определяться реальной разрешающей способностью приемного телевизионного голографического устройства.

Под разрешающей способностью в телевидении понимается максимальное число различимых светящихся пятен, укладывающихся на строке развертки. Если распределение плотности энергии луча, образующего изображение в плоскости экрана, подчиняется «нормальному» закону, то при пропорциональной зависимости яркости свечения экрана в рабочем диапазоне плотностей энергии от величины этой энергии распределение яркости свечения пятна имеет тот же закон. Исходя из этого, два пятна считаются различимыми, если между ними имеется участок со значением понижения относительного контраста на $K' = 0{,}1 \div 0{,}15$ [3.23].

Заданная частотно-контрастная характеристика телевизионного приемного устройства имеет вид

$$K'(\omega) = \exp\left[-\left(\frac{\pi}{2Q'}\right)^2\right], \qquad (3.25)$$

где Q' — параметр, характеризующий относительный размер воспроизводимого с заданным контрастом элемента изображения.

Размер строки (ширина) выбирается, исходя из отмеченного выше допустимого относительного контраста строки и промежутка между строками, т. е. $K' \approx 0{,}1$. В соответствии с этим выражение (3.25) можно записать в виде

$$K'(\omega) = \exp\left[-\left(\frac{2\pi\frac{T_x}{T}}{2Z_xQ}\right)^2\right], \qquad (3.26)$$

где T_x — время развертки одной строки; T — период любой частоты входного сигнала; Z_x — число элементов в строке, воспроизводимых с относительным контрастом $K'=0{,}1$; Q — параметр, характеризующий ширину строки при выполнении условия $K'=0{,}1$.

Из выражений (3.25) и (3.26) следует, что

$$\frac{T_x}{T} = \frac{Q\cdot Z_x}{2Q'}. \qquad (3.27)$$

Поскольку T_x/T равно числу периодов яркости в строке, соответствующих любой частоте входного сигнала, то для воспроизводимой пространственной частоты справедливо выражение

$$\nu = \frac{T_\lambda}{TH_x} = \frac{Q\cdot k\cdot Z_{тр}}{2Q'H_x}, \qquad (3.28)$$

где k — формат кадра; H_x — длина строки; $Z_{тр}$ — число строк, разрешаемых данной трубкой с $K'=0{,}1$.

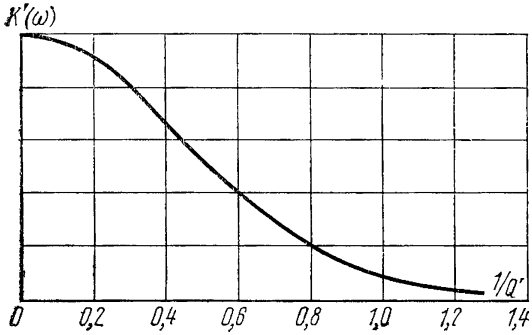


Рис. 3.12. Обобщенная частотная характеристика приемных трубок

Таким образом, если известна частотно-контрастная характеристика устройства воспроизведения, с помощью выражения (3.28) можно определить, с каким контрастом будут воспроизведены любые пространственные частоты. Учитывая, что $Q=0{,}95$, получим

$$\nu = 0{,}48\frac{k\cdot Z_{тр}}{Q'\cdot H_x} = 0{,}48\frac{Z_{тр}}{Q'H_y}, \qquad (3.29)$$

где H_y — высота растра.

Поскольку $\nu = Z/2H_y$, где Z — любое число строк разложения, то можно написать, что $Z=0{,}95Z_{тр}/Q'$.

На рис. 3.12 приведена обобщенная кривая частотной характеристики современных приемных трубок $K'(\omega) = f\left(\frac{1}{Q'}\right)$ [3.23].

Для «нормальной телевизионной системы» (см. § 2.1) необходимо выполнить условие $Z_{тр}=2{,}3\,Z$, тогда ур-ние (3.29) примет вид

$$\nu \approx 1{,}1\frac{Z}{Q'H_y} \text{ или } 1/Q' = 0{,}45 \quad (Q' = 2{,}2).$$

Относительный контраст воспроизводимых элементов при этом $K'\approx 0{,}7$.

Устройства воспроизведения телевизионных изображений подразделяются на

1) устройства, в которых функция модуляции светового потока объединена с функцией излучения;

2) устройства, в которых осуществляется модуляция независимого источника света.

Дифракционный принцип этапа восстановления изображения в голографии предполагает использование независимого источника света. Поэтому первый тип устройств воспроизведения телевизионных изображений, классическим прибором которых является кинескоп с люминесцентным экраном, неприемлем для построения голографической системы с завершенным циклом. Действительно, сигнал, несущий голографическую информацию, может быть преобразован кинескопом в распределение яркости свечения экрана $B(x', y')$. Однако, чтобы сформировать голограмму, необходимо произвести съемку с экрана кинескопа. Затем обработанную пленку осветить для восстановления световой волны. Таким образом, использование устройств первого типа возможно лишь в комбинации с пересъемкой и модуляцией независимого источника. Но в этом случае они переходят в класс устройств второго типа.

Устройства второго типа получили в телевидении распространение как проекционные. Основными элементами их являются:

а) световой модулятор, на котором создается несветящееся телевизионное изображение;

б) независимый источник света высокой интенсивности;

в) проекционный объектив;

г) светорассеивающий экран, на который проецируется изображение с поверхности светового модулятора.

Модуляция независимого источника света — характеристика этих устройств, которая является принципиальной основой возможности использования их для воспроизведения голографических изображений.

Модуляторы света строятся из материалов, у которых в соответствии с управляющим телевизионным сигналом возможно осуществить изменение некоторых свойств. В зависимости от характера изменяющихся свойств модуляторы света подразделяются на группы [3.24], основанные на:

а) изменении оптической плотности;

б) явлении поляризации света;

в) явлении дифракции света;

г) применении растровых оптических систем.

Из этих четырех групп для целей голографического воспроизведения могут быть использованы только светомодуляторы групп *а* и *г* Непригодность модуляторов *б* и *в* объясняется тем, что в случае *б* не создается структуры в плоскости модулятора, на которой возможна последующая дифракция восстанавливающего светового потока. В случае *в* несмотря на то, что формируется дифракционная решетка в функции видеосигнала (например в ультразвуковом модуляторе света), модулятор, по сути дела, имеет лишь один линейный размер, равный размеру строки H_x. Эквивалентная ширина его равна размеру элемента разложения. Практически не представляется возможным создать систему, состоящую из набора таких модуляторов, обеспечивающую требуемую эквивалентную ширину H_y, равную H_x/k. Для обычной системы телевизионного воспроизведения с использованием данного модулятора эта операция осуществляется путем дополнительной покадровой развертки света при проецировании на экран.

Характерной особенностью модуляторов группы *а* является их способность под действием электронного луча изменять прозрачность Таким образом, в функции видеосигнала можно сформировать амплитудную дифракционную решетку. Наиболее известным типом модуляторов этой группы является электронно-лучевая трубка с темновой записью, получившая название «скиатрон». Практическое применение в телевидении нашел модулятор с пленкой из поликристаллов KCl и KBr, получаемой путем конденсации паров указанных солей. Толщина пленки может быть получена равной 3—4 мкм, инерционность процессов потемнения и просветления при этом доходит до значений $\tau = 1/20 \div 1/15$ с для комнатной температуры. Однако использованию этих модуляторов для целей голографии препятствует их непрозрачность, так как пленка поликристалла представляет собой диффузно-рассеивающую среду.

В стадии экспериментального исследования находятся модуляторы независимого источника света, использующие монокристалл KCl. Трудность получения монокристаллов большого размера заставляет ограничивать размеры модуляторов величинами 30×30—70×80 мм. Толщина их (около десяти миллиметров) существенно больше толщины поликристаллов. Инерционность увеличивается до 10—20 с.

Модуляторы на монокристалле принципиально могут быть использованы для воспроизведения изображений методом голографии Схема воспроизведения изображена на рис. 3.13. Схема на рис. 3.13*а* изображает работу модулятора,

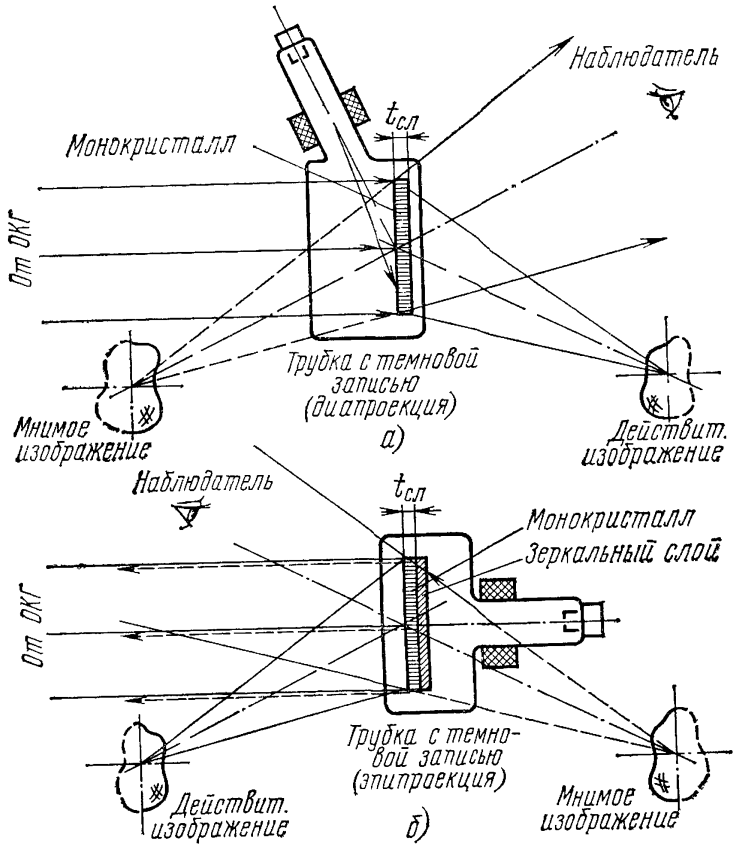


Рис. 3.13. Схема восстановления световой волны на трубке с темновой записью:
а — диапроекционной; *б* — эпипроекционной

предназначенного для диапроекции телевизионных изображений. На рис. 3.13*б* показана аналогичная схема на модуляторе, предназначенном для эпипроекции. Отличие от его предыдущего в том, что он имеет отражательный слой со стороны электронного луча, поэтому подсветку независимым источником можно производить со стороны наблюдателя. Однако использование когерентного света может создать мешающую наблюдению интерференционную структуру — результат взаимодействия света, отраженного от зеркальной части светомодулятора и передней стороны монокристалла (рис. 3.14).

Из модуляторов группы *г* для систем проекционного телевидения практическое применение нашел растровый электронно-оптический модулятор типа «Эйдофор» [3.26]. Принцип действия этих модуляторов отличается от принципа действия модуляторов света группы *а* тем, что под действием электронного луча создается скрытое изображение на оптически однородном материале в виде изменения либо коэффициента преломления этого материала, либо путем

деформации его поверхности. Визуализация изображения осуществляется с помощью растровой системы. В зависимости от материала светомодулирующей среды может быть изготовлено устройство для диапроекции или эпипроекции. Применительно к голографическому методу светомодуляторы данной группы позволяют в функции видеосигнала сформировать фазовые дифракционные структуры, являющиеся либо результатом изменения коэффициента преломления, либо рельефа оптической среды. При восстановлении волнового фронта нет необходимости использовать растровую систему.

На рис. 3.15 изображена возможная схема восстановления волнового фронта с помощью светомодулятора системы проекционного телевидения «Эйдофор». Вместо растровой системы (зеркальной диафрагмы) необходимо поставить полупрозрачное зеркало, с помощью которого возможно завести на светомодулятор восстанавливающий световой поток. Дифракция на рельефе светомодулятора, представляющая собой скрытую структуру переданной голограммы, приведет к восстановлению действительного и мнимого волновых фронтов. Поскольку светомодулятор системы «Эйдофор» не является плоским (вогнутое зеркало с нанесенным на его поверхность слоем масла толщиной $t_{сл} \approx 0{,}05$ мм), восстановленные световые волны сфокусируются в некоторой фокальной области.

Рис. 3 14. Изображение, восстановление с голограммы по методу эпипроекции

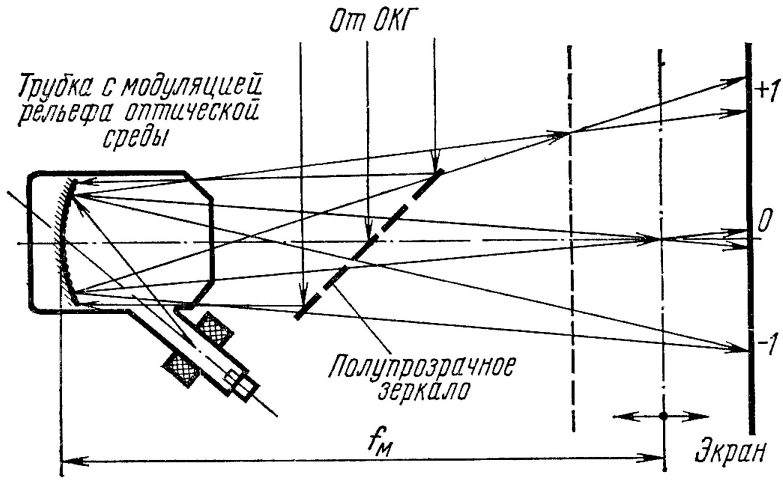


Рис. 3.15. Схема восстановления световой волны светомодулятором системы проекционного телевидения типа «Эйдофор»

Если поместить в эту область экран, то на нем будут воспроизводиться изображения, соответствующие ±1-му порядку дифракции. Параллельный восстанавливающий поток будет наблюдаться в виде яркой точки между изображениями.

Реальные возможности применения описанных выше светомодулирующих систем в голографических телевизионных системах могут быть оценены следующим образом. При передаче по телевизионному тракту информации о голографической структуре важно, чтобы заданное стандартом число элементов разложения было воспроизведено с заданным контрастом на приемной стороне. Поэтому условие согласования разрешающей способности

телевизионной системы с $\nu_{макс}$ голограммы можно записать в следующем виде:

$$\nu_{макс} = \frac{Z}{2\Delta h_{гол}} = \frac{Z_{тр}\,\Delta\varphi}{4{,}2\,\lambda\,Q'}, \qquad (3.30)$$

где $\Delta\varphi$ — требуемое угловое разрешение элементов изображения. В соответствии с этим выражением светомодулятор системы «Эйдофор», например, позволяет построить голографическую телевизионную систему, угол зрения которой находится из выражения

$$\sin\theta_{гол} = \frac{Z_{тр}\,\Delta\varphi}{4{,}2Q'} \qquad (3.31)$$

или для малых углов $\theta_{гол}$ — из выражения

$$\theta_{гол} \approx \frac{Z_{тр}\cdot\Delta\varphi}{4{,}2Q'}. \qquad (3.32)$$

При «нормальном» воспроизведении ($Q'=2{,}2$) промышленный светомодулятор, для которого $Z_{тр}=1200$, обеспечивает угол $\theta_{гол}=125\,\Delta\varphi$, а при воспроизведении по условию разрешения максимальной пространственной частоты ($Q'=1$) $\theta_{гол}=300\,\Delta\varphi$. Если $\Delta\varphi=3'$, то $\theta_{гол}$ составит 6° и 15° соответственно.

Как уже указывалось, светомодулятор типа «Скиатрон» может быть использован для воспроизведения голографических изображений, если он выполнен на монокристалле. Существенное уменьшение в этом случае вакантных узлов кристаллической решетки по сравнению с поликристаллами приводит к необходимости использовать очень толстые слои и электронные пучки большой энергии для получения одинакового контраста воспроизводимых изображений. Причем величина относительного контраста даже при $Q'\to\infty$ не первышает $K'=0{,}5$. Диаметр воспроизводимого элемента равен 0,15—0,22 мм при токе луча 400—1000 мкА и ускоряющем напряжении 20 кВ. При ускоряющем напряжении 25 кВ диаметр воспроизводимого элемента уменьшается лишь на 20%. Это означает, что светомодулятор на монокристалле не может воспроизвести пространственные частоты больше чем 2,5—4 лин/мм. Формирование структур по способу «нормального» воспроизведения невозможно. Совокупность всех указанных недостатков исключает возможность использования существующих образцов светомодуляторов на монокристалле для воспроизведения голографической информации телевизионным методом.

Формирование голограмм на приемной стороне возможно посредством пересъемки с экрана кинескопа. Очевидно, что удельная разрешающая способность фотоматериала должна обеспечивать возможность записи максимальных пространственных частот воспроизводимой на экране структуры голограммы без существенного ухудшения контрастных соотношений составляющих этой структуры. Предположим, что голографическая телевизионная система имеет угол зрения $\theta_{гол}=30°$. Согласно ур-нию (2.26) голо-

графическая телевизионная система должна иметь $Z = \frac{2}{\Delta\varphi}$ строк разложения. Значение удельной разрешающей способности фотоматериала при пересъемке определится разрешающей способностью кинескопа приемного устройства. Так, например, если последний обеспечивает «нормальное» воспроизведение элементов изображения, то согласно ур-нию (3.30), решаемому при значениях $Z_{тр}=2{,}3\,Z$ и $Q'=1$, требуется брать фотоматериал, разрешающий $\nu_{макс}\geqslant 2000$ лин/мм (при $\lambda=0{,}5\cdot10^{-3}$ мм). Фотоматериалы с высокой разрешающей способностью обладают очень низкой светочувствительностью (например «Микрат ВР» имеет чувствительность $5\cdot10^{-5}$ дж/см^2). Это накладывает ограничения на скорость формирования голограмм и должно привести к использованию кинескопов с высокой светоотдачей, т. е. проекционных кинескопов.

Выбор объектива для пересъемки необходимо произвести, исходя из требования компенсации линейного увеличения структуры исходного интерференционного поля, т. е. обеспечения $\beta_{рез}=1$. Поскольку кинескоп воспроизводит максимальную пространственную частоту $\nu_{макс.уг}=\frac{Z}{2H_y}$, то следует обеспечить уменьшение растра кинескопа в $\beta_0=\frac{Z}{2H_y\,\nu_{макс}}$ раз. Фокусное расстояние объектива должно быть равно

$$f_0\leqslant\frac{Z\cdot L_1}{2H_y\,\nu_{макс}+Z}=\frac{L_1}{\frac{\nu_{макс}}{\nu_{макс.уг}}+1} \qquad (3.33)$$

или для $\nu_{макс}\gg\nu_{макс.уг}$

$$f_0\leqslant\frac{L_1}{\beta_0}=\frac{L_1}{\beta}, \qquad (3.34)$$

где L_1 — расстояние от объектива до экрана при пересъемке. Из этих уравнений видно, что необходимо использовать микроскопную оптику, так как величина $\beta_0=\beta$ может достигать нескольких десятков. При этом возникают существенные трудности фокусировки изображения структуры на фотоматериале.

Таким образом, возможность использования современных телевизионных систем для воспроизведения голографических изображений определяется их реальной разрешающей способностью. Наибольшие возможности имеет система проекционного телевидения типа «Эйдофор» и метод пересъемки структуры голограммы с экрана кинескопа. Однако и в том и другом случаях максимальная пространственная частота сформированной в приемнике голограммы практически остается в несколько десятков раз меньше, чем соответствующая ей пространственная частота исходного голографического поля для нормальных углов зрения.

Как выяснено, требование высокой удельной разрешающей способности ограничивает возможности существующих телевизионных систем, которые принципиально могли бы быть применены для воспроизведения изображений методом восстановления светового волнового фронта. Обладающие наибольшими потенциальными возможностями светомодуляторы типа «Эйдофор», для которых в лабораторных условиях получена удельная разрешающая способность $\nu = 100$ лин/мм [3.26], возможно, обеспечивают тот технический предел разрешения, который не удастся преодолеть средствами электроники, поскольку требования уменьшения апертуры развертывающего электронного луча и сохранения при этом неизменной энергии его находятся в противоречии. Техническая задача формирования апертуры, соизмеримой с длиной волны света, становится чрезвычайно сложной.

Большими потенциальными возможностями преодоления этого предела обладает метод формирования телевизионного растра приемника с использованием светового пучка оптического квантового генератора [3.25]. В голографической телевизионной системе в этом случае развертка должна осуществляться на светочувствительном материале, способном изменять некоторые свои свойства под действием света. В табл. 3.1 [1] приведены для примера такие материалы. Для целей голографического телевидения наиболее подходят фотохромные стекла [3.27, 3.28].

Каковы же конкретные возможности использования фотохромных стекол в системах воспроизведения и, в частности, в голографических телевизионных системах? Информация на этих стеклах может быть записана либо путем затемнения при воздействии коротковолнового светового потока $\lambda = 0{,}36 \div 0{,}42$ мкм, либо путем просветления однородно-затемненного стекла при воздействии длинноволнового светового потока ($\lambda = 0{,}56 \div 0{,}63$ мкм). Для телевизионных систем формирование растра должно быть обеспечено разверткой светового пучка, сфокусированного сообразно требованиям на разрешающую способность.

Разрешающая способность самих фотохромных стекол может быть очень высокой. В процессе изготовления фотохромных стекол образуются кристаллы галогенидных соединений серебра круглой формы. Для типичных стекол этих кристаллов (с общей концентрацией 0,2%) будет около $4 \cdot 10^{15}$ частиц/см^3. Средний диаметр их 100 $\mathring{A}$. У обычных высокочувствительных фотоматериалов этот размер равен 20 000 $\mathring{A}$ (материалы с низким разрешением), а у низкочувствительных (с большим разрешением) около 1000 $\mathring{A}$.

Существенным ограничением использования фотохромных стекол в высокоскоростных системах воспроизведения является их инерционность, причем темп стирания зависит для одного и того

[1] Таблица составлена канд. техн. наук Синцовым В. Н. (ГОИ).

ТАБЛИЦА 3.1

Регистрирующая среда	Тип модуляции	Пороговая чувствительность, дж/см²	Спектральная чувствительность, мк	Разрешающая способность, линий/мм	Время хранения информации	Характер использования	Примечание
Галогенидо-серебряные фотоматериалы;							
*K*odak 649*F*	Амплитудно-фазовая	10^{-4}	0,4—0,7	>2000	∞	Однократное	—
«Микрат-ВР»	Амплитудно-фазовая	$5 \cdot 10^{-5}$	0,4—0,7	1500	∞	Однократное	—
Agfa-gevaert 14*C* 75	Амплитудно-фазовая	$3 \cdot 10^{-7}$	0,4—0,7	1500	∞	Однократное	—
Фотохромные стекла	Амплитудная, объемная	10^{-2} $5 \cdot 10^{-5}$	0,4—0,54 до 0,65	>2000	От 1 до 10^3 с	Многократное	Режим потемнения. Стирание нагреванием
Фотохромные кристаллы:							
KBr	Амплитудная, объемная	2	До 0,65	>2000	До суток	Многократное	Режим обесцвечивания после ультрафиолетового облучения
CaF_2 (La)	То же	0,15—0,6	—»—	—»—	24 ч	—»—	
CaF_2 (Ce)	—»—	1—3	—»—	—»—	Одна неделя	—»—	
$SrTiO_3$ (Fe+Mo)	—»—	0,1—0,3	—»—	—»—	10 мин	—»—	
SrF_2 (Sm+Nd)	—»—	1	—»—	—»—	Более недели	—»—	
Фотохромные пленки органические	Амплитудная, тонкослойная	5	До 0,63	>2000	От 5 мин до нескольких часов	Многократное с явлением «усталости»	Режим обесцвечивания после облучения
Слои PbJ_2	То же	0,1—0,3	0,4—0,54	>1000	При защите до года	Однократное	Сохраняет чувствительность после экспонирования
Слои фоторезистов	Фазовая, объемная	10^{-5}—10^{-2}	До 0,52	3000	∞	Однократное	—
Слои хромированного желатина	То же	10^{-2}	До 0,5	>2000	∞	Многократное	Требует проявления

Продолжение

Регистрирующая среда	Тип модуляции	Пороговая чувствительность, дж/см²	Спектральная чувствительность, мк	Разрешающая способность, линий/мм	Время хранения информации	Характер использования	Примечание
Фотополемиризующиеся слои	Амплитудная и фазовая, объемная	10^{-2}	До 0,7	1000	∞	Однократное	Требует ультрафиолетового облучения после экспонирования. Обладают светорассеянием
Термопластинки	Фазовая, объемная	10^{-3}	До 0,63	1000	∞	Многократное	Требует дополнительного нагревания
Мелкодоменные магнитные пленки	Амплитудная, тонкослойная, на отражение	1	Неселективны	2000	∞	—»—	—
Испаряющиеся металлические пленки	Амплитудная, тонкослойная	0,01—10	—»—	1000	∞	Однократное	—
Растворы криптоцианина	Амплитудная, объемная	10	До 0,7	250	В течение действия импульса ОКГ	Многократное	—
Кристаллы $LiNbO_3$	Фазовая, объемная	30—100	До 0,5	2000	Часы	—»—	Стирание нагреванием

же стекла от уровня, до которого производится затемнение. Однако скорость стирания может быть увеличена либо путем принудительного нагревания стекла, либо путем воздействия на него длинноволнового светового потока большой мощности. На рис. 3.16 приведены кривые для нескольких стекол фирмы «Corning Glass», показывающие зависимость просветления от времени при нагревании электропроводного тонкого оксидного слоя, напыленного на стекло [3.28].

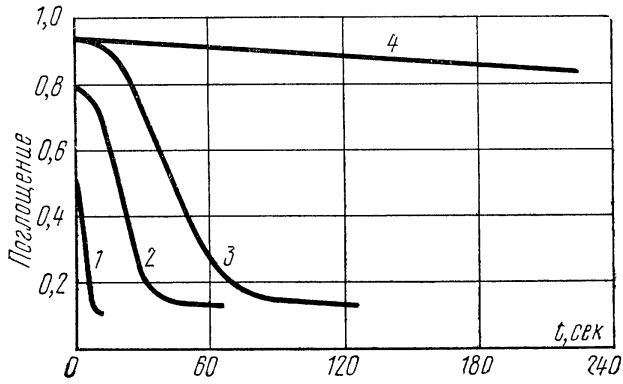


Рис. 3.16. Зависимость просветления фотохромных стекол от времени при принудительном нагревании (Corning Glass)·

1 — Стекло *EX — NE* (1/64″, 14 watts/in²); *2* — Стекло *EX* — LD (1/8″, 17 watts/in²); *3* — Стекло *EX — LD* (1/4″, 12 watts/in²); *4* — Стекло *EX* — LD (1,4″, не нагревалось)

Не менее существенным недостатком является то, что фотохромные стекла имеют все же ограниченную возможность циклического использования. По сравнению с органическими фотохромными материалами число циклов увеличивается приблизительно в 10^3 раз (составляет как минимум $3 \cdot 10^5$ циклов), но этого числа циклов может быть достаточно только для сравнительно низкоскоростных воспроизводящих систем.

Использованию фотохромных стекол для целей телевизионного голографического воспроизведения препятствует также большая их толщина (больше 100 мкм). Существенное по сравнению с размерами кристаллов расстояние между ними (в среднем $6 \cdot 10^{-8}$ м) не позволяет реализовать потенциальную возможность высокого разрешения при сохранении требуемой плотности почернения. Чтобы получить пятно с требуемой плотностью почернения, необходимо либо задать диаметр воздействующего луча света в несколько раз больше, чем диаметр кристалла, чтобы он активировал сразу группу кристаллов, расположенных вдоль слоя, либо брать более толстый слой. Однако эта проблема успешно решается. Предложен и экспериментально обоснован метод получения фотохромных стекол, посредством которого кристаллы гологенидных соединений серебра образуются в тонком поверхностном слое стекла [3.29]. При этом сохраняются (или улучшаются) все фотохромные свой-

ства сравнительно со стеклами, изготовленными обычным способом.

Все фотохромные материалы имеют очень низкую чувствительность. Если сравнить их по чувствительности с обычными фотоматериалами, то в предельном случае требуется приблизительно в 10^8 раз большая энергия активации для получения одинаковой плотности почернения. Для просветления она увеличивается еще на порядок.

В настоящее время разработка фотохромных стекол для различных нужд ведется очень интенсивно. Ставятся задачи — в ближайшее время получить стекла, затемняющиеся за $\tau = 10$ мкс с прозрачности 75% до 0,01% в видимом диапазоне спектра света ($\lambda = 0{,}4 \div 0{,}7$ мкм) [3.27]. Определенные достижения получены при разработке неорганических фотохромных материалов [3.30]. Указывается, что есть высокоскоростные фотохромные соединения, обеспечивающие скорость изменения состояния вещества за время меньше, чем 10^{-8} с. Они выдерживают до 10^6 циклов изменения состояния Однако и для них остается проблема увеличения плотности фотохромных центров, чтобы иметь возможность уменьшить рабочую толщину фотохромного материала.

В силу рассмотренных причин фотохромные материалы еще не нашли широкого применения в системах воспроизведения. Однако тенденция развития этого направления увеличивается с развитием квантовой электроники и голографии. Изыскиваются средства и способы использования фотохромных материалов с уже достигнутыми параметрами для построения устройств воспроизведения изображений. Например, предложена электронно-лучевая трубка с экраном из фотохромного стекла [3.31]. предназначающаяся для запоминания информации на короткое время. Общий принцип ее работы пояснен на рис. 3.17.

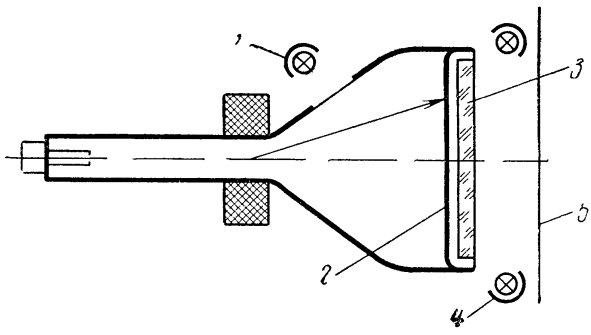


Рис. 3.17. Электронно-лучевая трубка с экраном из фотохромного стекла:

1 — источник зеленого света; *2* — люминофор УФ излучения ($\lambda < 0{,}4$ мкм); *3* — фотохромное стекло; *4* — источники красного света ($\lambda > 0{,}6$ мкм), *5* — зеленый светофильтр

Фотохромное стекло вваривается в план-шайбу электронно-лучевой трубки, с внутренней стороны которой нанесен люминофор, излучающий свет со спектральным составом $\lambda \leqslant 0{,}4$ мкм. Запись информации производится электронным лучом. Распределение интенсивности свечения люминофора преобразуется фотохромным стеклом в распределение прозрачности. Считывание информации наблюдателем производится с использованием подсвечивающего источника зеленого цвета через зеленый светофильтр, препятствующий попаданию на экран света от источников освещения помещения. Источники красного света ($\chi_2 \geqslant 0{,}6$ мкм) позволяют быстро стирать прочитанную информацию, делая фо-

тохромное стекло прозрачным. Разрешающая способность трубки определяется размером пятна излучения люминофора Наличие промежутка между слоем люминофора и фотохромным стеклом ухудшает ее вследствие рассеяния излучения, что затрудняет получение высокого удельного разрешения. Трубка применима для воспроизведения голографической информации, но только с низкими пространственными частотами.

Ограничения, которые вносит современное развитие фотохромных материалов, описаны выше. Дополнительные трудности будут связаны с требованием обеспечения как минимум в четыре раза большей, чем для существующей телевизионной системы, скорости развертки светового луча при сохранении высокой разрешающей способности. Наибольшие возможности сохранения указанной разрешающей способности до последнего времени имели механические системы развертки [3.9]. Однако требуемые скорости развертки практически исключают их использование. В настоящее время наиболее перспективным в этом отношении является лазерный кинескоп.

Таким образом, возможность использования фотохромных материалов для построения приемных устройств голографической телевизионной системы в настоящее время определяется их реальными техническими характеристиками и существующими техническими достижениями в разрешении задачи использования луча ОКГ для построения телевизионных систем воспроизведения изображений. Практически это означает, что возможность использования фотохромных материалов ограничена областью телевизионных систем с медленными развертками.

Общие вопросы построения приемных экранов голографических телевизионных систем

Удельная разрешающая способность среды, на которой формируется голограмма, определяет угол зрения системы воспроизведения, т. е. задает тот телесный угол, в котором распространяется восстановленная световая волна. Однако, чтобы наблюдатель мог одновременно видеть все изображение, соответствующее этому углу зрения, а не просматривать его по частям, необходимо соблюдать определенные условия рассматривания. Действительно, минимальный объем голографической информации задается требуемой четкостью изображения и определяется ур-нием (2.26). Если по телевизионному тракту передается только эта информация, то в приемнике необходимо сформировать голограмму, размеры которой задаются ур-нием (2.24). Например, при $\theta_{гол}=30°$ и $\Delta\varphi=3'$, $Z=2400$, а $\Delta h_{гол} \approx \frac{2\lambda}{0{,}8\cdot 10^{-3}}$ (для $\lambda=0{,}4\div 0{,}63$ мкм, $\Delta h_{гол} \approx$ $\approx 1—1{,}6$ мм).

Наблюдатель рассматривает изображение через «окно», равное размеру голограммы. Естественно, что для сохранения угла зрения

он должен приблизить в этом случае глаз к голограмме так, чтобы выполнялось следующее равенство (рис. 3.18):

$$H_x = 2L'_{\text{гол}} \operatorname{tg} \theta'/2, \tag{3.35}$$

где $L'_{\text{гол}}$ — расстояние от глаза наблюдателя до голограммы.

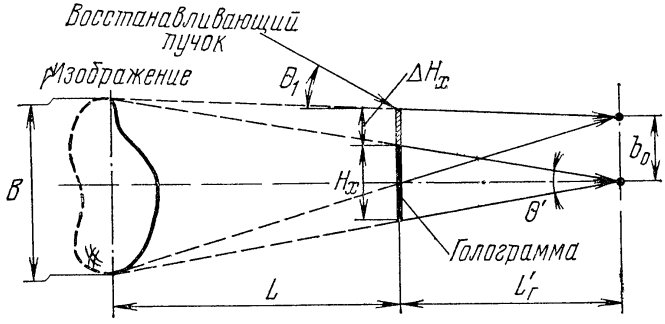


Рис. 3.18. Схема наблюдения изображения через голограмму

С другой стороны, $\operatorname{tg} \theta'/2 = \dfrac{B_x}{2(L + L'_{\text{гол}})}$, следовательно, для линейного размера голограммы можно записать

$$H_x = \frac{B_x}{L/L'_{\text{гол}} + 1}. \tag{3.36}$$

Кроме того, следует учесть, что при рассматривании изображения двумя глазами (бинокулярно) величину H_x необходимо увеличить на $\Delta H_x = \dfrac{b_0}{1 + L'_{\text{гол}}/L}$, где b_0 — глазной базис (рис. 3.18), т. е. окончательно получаем

$$H_x = H_x + \Delta H = \frac{B_x}{L/L'_{\text{гол}} + 1} + \frac{b_0}{1 + L'_{\text{гол}}/L}. \tag{3.37}$$

Поскольку обычно $B_x \gg b_0$, то

$$H_x \approx \frac{B_x L'_{\text{гол}}}{R_L}, \tag{3.38}$$

где $R_L = L'_{\text{гол}} + L$.

Таким образом, объем голографической информации, который следует передать, будет определяться также и требованиями к условиям рассматривания изображений. При бинокулярном рассматривании по каналу связи необходимо передать объем голографической информации, распределенный на площади $S_{\text{гол}} = \dfrac{H_x^2}{k}$, где k — формат голограммы, которую требуется сформировать на приемной стороне.

Предположим, что является допустимым оставить для наблюдателя возможность рассматривать объемное изображение с некоторого конечного числа фиксированных позиций (см. § 2.3*а*). В этом случае выборку участков $S_{эл}$ с площади $S_{гол}$ необходимо производить с определенным сдвигом b_x по горизонтали и b_y по вертикали [3.33]. Число ракурсов восстановленного изображения $m=\left(\frac{H_x}{b_x}-1\right)\frac{H_y}{b_y}=(n_x-1)n_y$, где n_x и n_y — число выбранных участков по горизонтали и по вертикали соответственно.

Далее, если учесть, что бинокулярное зрение человека не обеспечивает восприятие вертикального параллакса, то следует исключить из передачи информацию о всех вертикальных ракурсах изображения, кроме одного: $n_y=1$. Остается возможность рассматривать изображение с (n_x-1) горизонтальных позиций. По каналу связи следует передать информацию с $n_x=\frac{H_x}{b_x}$ участков структуры голографического поля. Уравнения (3.6) и (3.7) для определения требуемой полосы частот канала голографической системы примут соответственно вид

$$\Delta F_{гол.т}=\frac{8\Delta h^2_{гол}}{\lambda^2 T_{эл}} \tag{3.39}$$

и

$$\Delta F_{гол.т}\approx\frac{2\Delta h^2_{гол}\nu^2_{макс}}{T_{эл}}, \tag{3.40}$$

где $T_{эл}=\frac{T_к}{n_x}$ — время передачи одной элементарной площадки голограммы, равное времени кадра $T_к$, поделенного на число передаваемых площадок n_x.

Таким образом, при отмеченных выше условиях вся информация, необходимая для воспроизведения изображения на приемной стороне, содержится в голограмме, изображенной на рис. 3.19

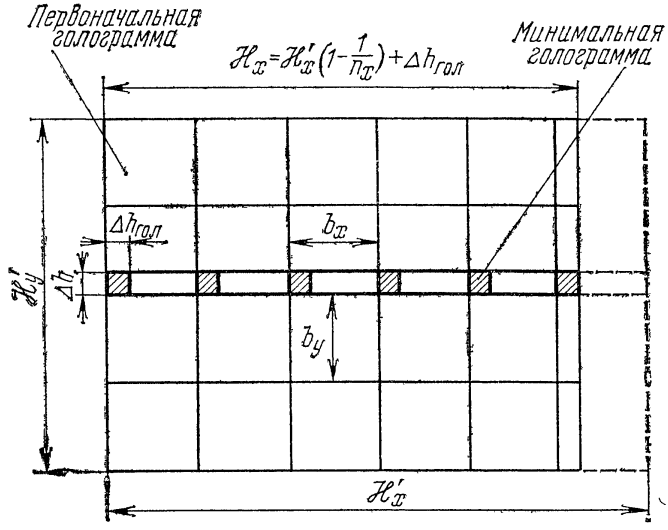


Рис. 3.19. Голограмма, содержащая необходимую информацию (заштрихованные участки)

(заштрихованные участки). На приемной стороне необходимо формировать синтезированную голограмму.

Если на приемной стороне требуется сформировать голограмму с горизонтальным линейным размером H'_x, очевидно, необходимо осуществить для передачи выборку участков $\Delta h^2_{\text{гол}}$ на длине структуры голографического поля, равной $H_x = H'_x - b_x + \Delta h_{\text{гол}}$. Поскольку $b_x = H'_x/n_x$, то получим уравнение

$$H_x = H'_x\left(1 - \frac{1}{n_x}\right) + \Delta h_{\text{гол}}. \qquad (3.41)$$

При $n_x \gg 1 H_x \approx H'_x$. Очевидно, этот случай соответствует передаче информации о непрерывной смене ракурсов рассматривания. Если $n_x = 2$, то восстанавливаются условия бинокулярного рассматривания с одного ракурса; $n_x = 1$ обеспечивает возможность только монокулярного восприятия объемности изображения. В последнем случае и горизонтальный и вертикальный размеры синтезированной в приемнике голограммы определяются допустимостью многократного повторения участка $\Delta h^2_{\text{гол}}$.

Рассмотренные способы устранения ограничений рассматривания голографических телевизионных изображений показывают принципиальную возможность решения этой задачи. Практическое же их воплощение встречает весьма большие трудности и связано это, в первую очередь, с требованием скорости передачи. Так, для телевизионной системы необходимо потребовать формирование синтезированной голограммы за время передачи кадра, т. е. за $T_к = 0{,}04$ с. Возможным способом выполнения этого условия является оптическое синтезирование [2.15], например с использованием волоконной оптики [3.35] (рис. 3.20). Однако в этом случае

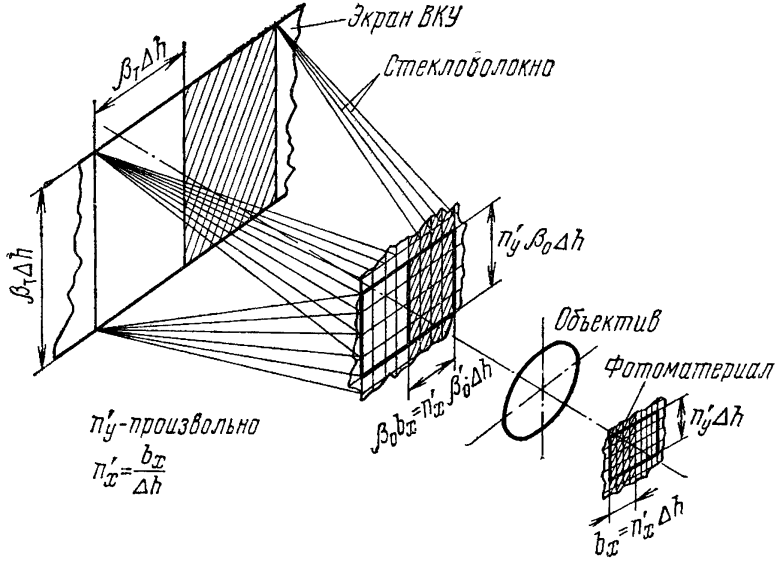


Рис. 3.20. Схема синтезирования голограммы с использованием волоконной оптики ($\beta_т = \beta_0 \beta_{во}$, где $\beta_{во}$ — линейное увеличение волоконной оптики)

очень серьезной становится задача изготовления стекловолоконных оптических устройств, обеспечивающих удельную разрешающую способность, близкую к 1000 лин/мм, и смонтированных таким образом, чтобы свет от каждого элемента структуры, воспроизводимой, например, на экране кинескопа, разводился на $n_c = b_x/\Delta h_{гол} \cdot n'_y$ участков синтезированной голограммы. Этот способ не исключает необходимость использования светочувствительной среды с высоким разрешением, на которой следует сформировать голограмму. Возможность использования в этом случае оптики несколько уменьшает требование к диаметру стекловолокна, однако ее собственные характеристики должны быть близки к идеальным. В противном случае аберрации не позволят реализовать данную систему для высоких пространственных частот голограммы. Необходимость использования светочувствительных материалов (фотоматериалов, фотохромных сред и др.) вносит в эту систему наиболее существенные скоростные ограничения.

Из изложенного выше становится ясным, что решение задачи синтезирования голограммы для построения телевизионной голографической системы воспроизведения связано с необходимостью разработки и построения специального приемного голографического телевизионного устройства. Основной его особенностью является то, что такое приемное устройство должно обладать удельной разрешающей способностью $R \geqslant \nu_{макс} \approx \frac{\theta_{гол}}{\lambda}$ лин/мм и воспроизводить в строке $Z_x = 2\nu_{макс} H'_x$ элементов, где H'_x — горизонтальный линейный размер экрана приемника.

Возьмем для примера реальные условия наблюдения многоракурсного голографического изображения ($n_x \gg 1$, $L > L'_{гол} \gg b_0$), тогда $H'_x \approx H \approx \theta_{гол} L'_{гол}$ и число элементов в строке на приемной стороне

$$Z_x \approx \frac{2\theta^2_{гол} L'_{гол}}{\lambda}. \qquad (3.42)$$

Предположим, что $L'_{гол} = 2$ м, $\theta_{гол} = 30°$, $\lambda = 0{,}63 \cdot 10^{-3}$ мм, тогда $Z_x \approx 10^6$ элементов. Иначе говоря, трудности реализации приемного устройства голографической телевизионной системы, обеспечивающей наблюдателю ограниченное число ракурсов рассматривания изображения, остаются точно таким же, как и прежде, т е при непрерывной смене ракурсов.

Воспроизведение изображений с синтезированных голограмм

Основой метода синтезирования голограммы является последовательное повторение голограммы, содержащей объем информации, достаточный для обеспечения заданного разрешения элементов изображения. При восстановлении изображения с двух одинаковых голограмм, сдвинутых друг относительно друга в плоскос-

ти их расположения, обеспечить неискаженное воспроизведение можно только с одной из них. Величина искажений будет накапливаться с увеличением числа повторяемых участков, т. е. размера синтезированной голограммы. В связи с этим возникает задача, во-первых, определить характер этих искажений; во вторых, оценить влияние их на изображение, восстанавливаемое с синтезированной голограммы, что, в свою очередь, позволит оценить возможности формирования синтезированной голограммы заданного размера.

Характер искажений изображения при синтезировании голограммы посредством последовательного повторения одного и того же участка голограммы определяется рассогласованием условий формирования участка голограммы и условий воспроизведения с него изображения. При рассмотрении общих вопросов голографического воспроизведения изображений принимались во внимание идеальные условия формирования голограммы и восстановления световой волны. Использовался идеально плоский волновой фронт опорного и освещающего объект световых пучков при формировании голограммы, а при восстановлении изображения — идеально плоский волновой фронт восстанавливающего светового потока. Кроме того, предполагалось абсолютно точное соблюдение равенства угла падения восстанавливающего потока на голограмму углу падения опорного пучка на фотоматериал при записи.

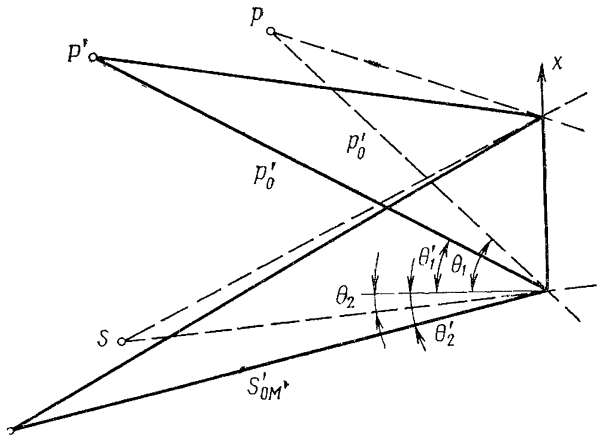


Рис. 3.21. Схема восстановления с голограммы изображения точечного источника при несоответствии условий формирования голограммы (пунктир) и воспроизведения изображения

В общем случае волновой фронт опорного и освещающего пучков не идеально плоский. Он может быть сферическим или иметь произвольную форму. При восстановлении это относится к восстанавливающему пучку. Геометрическое соответствие схемы формирования и схемы восстановления изображения также не выполняться. В этом случае неизбежны геометрические искажения восстанавливающего изображения [3.34].

На рис. 3.21 изображена схема восстановления изображения с голограммы, которая сформирована в световых пучках со сферическими волновыми фронтами, и для восстановления также используется сферический волновой фронт. Это наиболее типичный случай. Тонкими пунктирными линиями показаны условия формирования голограммы. Толщина слоя, на котором записана голограмма, не принимается во внимание (слой считается бесконечно тонким).

Расположение восстанавливаемого элемента изображения определяется фазовой характеристикой уравнений, которые при условии $e(x, y)/e_0 < 1$ можно записать в следующем виде.

действительного: $\varepsilon_д = a_д \exp\{i[\omega t + k(s - p' - p) - \varphi_s + \varphi_{p'} + \varphi_p]\}$;

мнимого: $\varepsilon_м = a_м \exp\{i[\omega t + k(-s - p' + p) + \varphi_s + \varphi_{p'} - \varphi_p]\}$;

где k — волновое число; φ — начальная фаза любой из указанных на рис. 3.21 световых волн, распространяющихся вдоль направлений p, p' или s; $a_д$, $a_м$ — постоянные.

Несоответствие фазовых характеристик написанных выражений фазовым характеристикам, обеспечивающим геометрически не искаженное воспроизведение изображения, определяется смещением точки P' (источника восстанавливающего потока) относительно точки P (источника опорного потока), т. е. фазовая характеристика в плоскости xy будет пропорциональна члену $p' + (p - s)$ для действительного изображения и $p' - (p - s)$ для мнимого. В соответствии с рис. 3.21 для любых положений точки P' относительно точки P можно написать:

$$p' \pm (p - s) = [(p'_0 \sin\theta'_1 - x)^2 + (p'_0 \cos\theta'_1)^2]^{1/2} \pm$$

$$\pm [(p_0 \sin\theta_1 - x)^2 + (p_0 \cos\theta_1)^2]^{1/2} \mp [(s_0 \sin\theta_2 - x)^2 + (s_0 \cos\theta_2)^2]^{1/2} =$$

$$= p'_0 \left[1 + \frac{x^2}{(p'_0)^2} - \left(\frac{2x}{p'_0}\right)\sin\theta'_1\right]^{1/2} \pm p_0 \left[1 + \frac{x^2}{p_0^2} - \left(\frac{2x}{p_0}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \sin\theta_1\right]^{1/2} \mp s_0 \left[1 + \frac{x^2}{s_0^2} - \left(\frac{2x}{x_0}\right)\sin\theta_2\right]^{1/2}, \qquad (3.43)$$

где p'_0, p_0 и s_0 — фиксированные расстояния от голограммы до восстанавливающего и опорного источников и объекта соответственно.

Принимая во внимание условие $H_x \ll p'_0$, p_0, s_0, разлагаем ур-ние (3.43) в биномиальный ряд. Получим для степеней не выше второй

$$p' \pm (p - s) \approx (p'_0 \pm p_0 \mp s_0) - x(\sin\theta'_1 \pm \sin\theta_1 \mp \sin\theta_2) +$$

$$+ \left(\frac{x^2}{2}\right)\left(\frac{\cos^2\theta'_1}{p'_0} \pm \frac{\cos^2\theta_1}{p_0} \mp \frac{\cos^2\theta_2}{s_0}\right). \qquad (3.44)$$

В ур-нии (3.44) постоянный член, определяющий постоянный сдвиг, не вносит искажений. Второй член определяет направление, в котором распространяются действительная и мнимая волны:

$$\left.\begin{aligned} \sin\theta'_{2д} &= \sin\theta'_1 + \sin\theta_1 - \sin\theta_2, \\ \sin\theta'_{2м} &= \sin\theta'_1 - \sin\theta_1 + \sin\theta_2. \end{aligned}\right\} \qquad (3.45)$$

Последний член ур-ния (3.44) эквивалентен форме задания расстояния от начала системы координат p'_0, p_0, s_0 до некоторой

точки, т. е. он определяет расстояния $s'_{0д}$ и $s'_{0м}$ от голограммы до восстановленных изображений действительного и мнимого:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\cos^2\theta'_{2д}}{s'_{0д}} &= \frac{\cos^2\theta'_1}{p'_0} + \frac{\cos^2\theta_1}{p_0} - \frac{\cos^2\theta_2}{s_0},\\ \frac{\cos^2\theta'_{2м}}{s'_{0м}} &= \frac{\cos^2\theta'_1}{p'_0} - \frac{\cos^2\theta_1}{p_0} + \frac{\cos^2\theta_2}{s_0}.\end{aligned}\right\} \qquad (3.46)$$

Произведем анализ полученных результатов применительно к восстановлению мнимого изображения. Для этого второе уравнение системы (3.45) приведем к следующему виду:

$$\sin\theta'_{2м} - \sin\theta_2 = \sin\frac{\Delta\theta_1}{2}\left(\cos\frac{\Delta\theta_1}{2}\cos\theta_1 - \sin\frac{\Delta\theta_1}{2}\sin\theta_1\right), \qquad (3.47)$$

где $\Delta\theta_1 = \theta'_1 - \theta_1$.

Практически величина $\Delta\theta_1$ не может превышать 10—15°, так как голограмма фиксируется на некотором слое светомодулятора, имеющем конечную толщину. Это обстоятельство заставляет при восстановлении изображения ориентировать голограмму, приблизительно удовлетворяя исходные угловые условия. Принимая это во внимание, для малых углов $\theta_1 \leqslant 30°$ выражение (3.47) перепишем в следующем виде:

$$\sin\theta'_{2м} - \sin\theta_2 \approx \frac{1}{2}\Delta\theta_1\cos\theta_1. \qquad (3.48)$$

Это выражение определяет закон угловых искажений при восстановлении изображения с голограммы для небольших угловых несоответствий условий формирования голограммы условиям воспроизведения.

Определим, при каких условиях можно считать, что угловое смещение элементов восстанавливаемого изображения равно $\Delta\theta_1$, т. е. имеет место только вращение объекта, обусловленное неравенством углов θ'_1 и θ_1. Для этого необходимо потребовать, чтобы $\Delta\theta_2 = (\theta'_{2м} - \theta_2) = \Delta\theta_1$. Тогда принятые ограничения для θ_1 справедливы при преобразовании левой части ур-ния (3.48).

Выполнив его, получим

$$\Delta\theta_2 = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}\Delta\theta_1. \qquad (3.49)$$

На рис. 3.22 приведены графики зависимости $\frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_1} = f(\theta_2)$ для нескольких значений θ_1. Видно, что условие $\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1$ выполняется только для отдельных точек изображения. Это, во-первых, относится к точкам, которые при формировании голограммы видны под углом θ_1. Однако они не могут наблюдаться, так как это направление совпадает с эталонным световым потоком. Во-вторых, неискаженно воспроизведутся точки, видимые под углом $-\theta_1$. Все остальные точки изображения при $\Delta\theta_1 \neq 0$ повернутся на угол $\Delta\theta_2 / \Delta\theta_1$, что соответствует геометрическим искажениям изобра-

жения. Наибольшей деформации подвергается часть сцены, для которой $\theta_2=0$.

Для того чтобы произвести анализ выражения (3.46) для мнимого изображения, перепишем его в следующем виде:

а) для условия, когда $\Delta\theta_1\neq 0$, а $p_0=p'_0$

$$s'_{0м}=\frac{\cos^2\theta'_{2м}}{\frac{(\sin\theta_1-\sin\theta'_1)(\sin\theta_1+\sin\theta'_1)}{p_0}+\frac{\cos^2\theta_2}{s_0}}\approx\frac{\cos^2\theta'_{2м}}{\cos^2\theta_2}s_0, \qquad (3.50)$$

б) для условия, когда $\Delta\theta_1=0$, а $p_0\neq p'_0$

$$s'_{0м}=\frac{\cos^2\theta'_{2м}}{\left(\frac{1}{p'_0}-\frac{1}{p_0}\right)\cos^2\theta_1+\frac{\cos^2\theta_2}{s_0}}. \qquad (3.51)$$

Из ур-ния (3.50) видно, что поворот восстанавливающего светового потока на $\Delta\theta_1$ относительно угла падения опорного пучка приводит, помимо угловых, к изменению и масштабных соотношений изображения относительно объекта. Однако основные масштабные искажения вносят различие длины путей опорного и восстанавливающего световых потоков (3.51) (рис. 3.23).

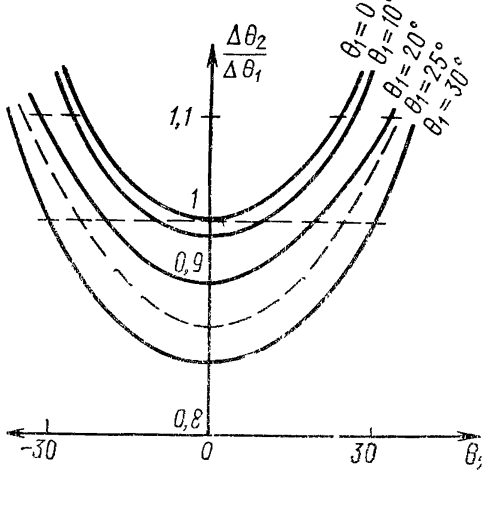


Рис. 3.22. Зависимость относительного углового смещения элементов восстанавливаемого изображения от параметров схемы формирования голограммы

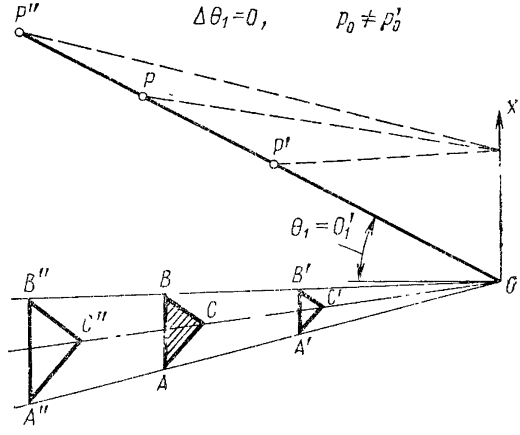


Рис. 3.23. Общий характер масштабных искажений восстанавливаемого изображения при несоответствии угловых и дистанционных условий формирования голограммы и воспроизведения

Таким образом, анализ фазового члена основного уравнения голограммы показал, что несоответствие условий формирования голограммы условиям воспроизведения с нее изображений (неравенство угла падения опорного светового пучка углу падения восстанавливающего светового пучка, а также различная удаленность их источников от плоскости светочувствительного материала

и голограммы соответственно) приводит к геометрическим искажениям восстанавливаемого изображения. Неравенство углов приводит к изменению относительного расположения элементов восстанавливаемого изображения как вдоль плоскости голограммы, так и по глубине сцены. Несоответствие дистанционного расположения источников приводит к изменению относительного расположения элементов по глубине сцены, проявляясь в виде изменения масштаба наблюдаемого изображения, а потому не ухудшает качество изображения.

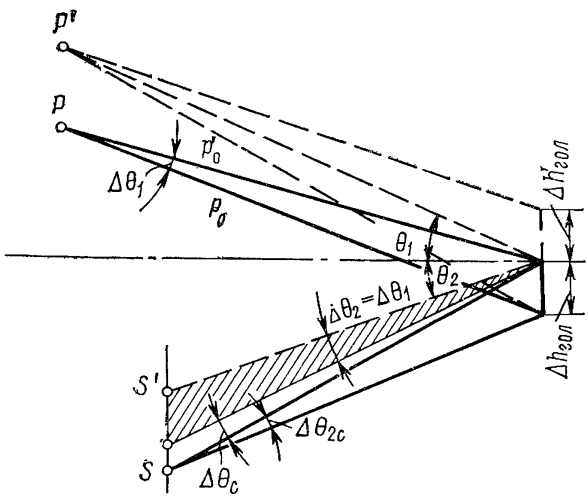


Рис. 3.24. Компенсация углового несовмещения изображений при синтезировании голограммы

На рис. 3.24 изображена схема восстановления изображения с двух одинаковых голограмм размером $\Delta h^2_{гол}$, сдвинутых вдоль оси x относительно друг друга. В этом случае, очевидно, следует принять во внимание искажение изображения, которое проявляется вследствие неидентичности условий восстановления и условий формирования повторяющихся участков — голограмм. Действительно, предположим, что расположение восстанавливающего источника P совпадает с расположением источника опорного потока относительно участка голограммы $\Delta h_{гол}$ (рис. 3.24). Для неискаженного восстановления изображения с участка голограммы $\Delta h'_{гол}$ необходимо поместить восстанавливающий источник в точку P' (смотри рис. 3.24). При этом, однако, неискаженное восстановленное изображение оказалось бы сдвинутым в точку S' относительно изображения, восстанавливаемого с участка $\Delta h_{гол}$. Поскольку источник восстанавливающего потока не меняет своего положения относительно $\Delta h_{гол}$, использование идентичного участка $\Delta h'_{гол}$ приводит к относительному изменению условий формирования этого участка и условий восстановления с него изображения. Изменение угла падения восстанавливающего пучка для участка $\Delta h'_{гол}$ относительно угла падения опорного пучка приводит к изменению угловых соотношений восстановления элементов изображения, описываемому ур-нием (3.40). Это обстоятельство приводит к тому, что при восстановлении изображения по схеме рис. 3.24 изображение, получаемое с участка $\Delta h'_{гол}$, будет иметь тенденцию совпасть с изображением, получаемым с участка $\Delta h_{гол}$, переместившись в точку S'' ($\Delta\theta_2 \approx \Delta\theta_1$).

Геометрия рис. 3.24 позволяет написать следующее уравнение:

$$s_0 \sin \Delta\theta_{2c} = (n'_x - 1)\,\Delta h_{гол} \cos\theta_2, \qquad (3.52)$$

где $\Delta\theta_{2c}$ — необходимое угловое смещение изображения S' для совпадения с изображением S.

Учитывая, что $\sin\Delta\theta_{2c}\approx\Delta\theta_{2c}$, так как $\Delta\theta_{2c}$ мал, напишем выражение для $\Delta\theta_{2c}$ в следующем виде:

$$\Delta\theta_{2c}=\frac{\left(n'_x-1\right)\Delta h_{1\,\text{ол}}\cos\theta_2}{s_0}. \tag{3.53}$$

Угловое несовмещение изображений S' и S при синтезировании голограммы в результате действия условия (3.49) определим как

$$\Delta\theta_c=\Delta\theta_{2c}-\Delta\theta_2=\frac{\left(n'_x-1\right)\Delta h_{\text{гол}}\cos\theta_2}{s_0}-\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}\Delta\theta_1. \tag{3.54}$$

Из геометрии рис. 3.24 можно написать, что

$$\Delta\theta_1=\frac{\left(n'_x-1\right)\Delta h_{\text{гол}}\cos\theta_1}{p_0}. \tag{3.55}$$

Подставляя значение $\Delta\theta_1$ в ур-ние (3.54), получим

$$\Delta\theta_c=(n'_x-1)\,\Delta h_{\text{гол}}\left(\frac{\cos\theta_2}{s_0}-\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}\frac{\cos\theta_1}{p_0}\right). \tag{3.56}$$

Если отношение $\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}$ выбрано так, что во всем диапазоне изменения угла θ_2 его можно считать равным единице, то ур-ние (3.56) переписывается в следующем виде:

$$\Delta\theta_c\approx\Delta h_{\text{гол}}\left(n'_x-1\right)\left(\frac{1-\frac{s_0}{p_0}}{s_0}\right)\cos\theta_1. \tag{3.57}$$

Величина угла $\Delta\theta_c$ должна быть задана как допустимая на несовмещение изображений, восстанавливаемых с n'_x одинаковых участков, тогда выражение (3.57) можно переписать в следующем виде:

$$\Delta\theta_c\approx b_x\left(\frac{1-s_0/p_0}{s_0}\right)\cos\theta_1, \tag{3.58}$$

где $b_x=n'_x\Delta h_{\text{гол}}$ — размер голограммы, синтезированной из одинаковых участков.

Обозначим отношение $s_0/p_0=k$, где k — любое положительное число от 0 до ∞, тогда

$$\Delta\theta_c=\frac{b_x\cos\theta_1}{p_0}\left(\frac{1}{k}-1\right). \tag{3.59}$$

На рис. 3.25 показана зависимость $\Delta\theta_c=f(k)$ при заданных b_x, p_0 и θ_1. Из графика видно, что $\Delta\theta_c=0$ только при $k=1$ ($s_0=p_0$). Во всех остальных случаях имеет место несовмещение изображений, восстанавливаемых с разных участков синтезированной голограммы. Условия синтезирования лучше для случая $s_0>p_0$. Когда $p_0=\infty$, $\Delta\theta_c=\frac{b_x\cos\theta_1}{s_0}$.

Таким образом, при восстановлении изображений с двух абсолютно одинаковых участков голограммы, сдвинутых относительно

друг друга, когда условия формирования и восстановления сохраняются только для одного из них, эти изображения имеют тенденцию совмещения. Это обстоятельство и позволяет осуществить синтезирование голограммы путем последовательного повторения одного и того же участка в вертикальном и горизонтальном направлениях. Размеры этой голограммы определяются допуском на угловое несовмещение изображений, восстанавливаемых с ее крайних участков. Величина остаточного несовмещения зависит как от угловых, так и от дистанционных соотношений схемы формирования голограммы (для углов $\theta_2=\theta_1<20°$ только от дистанционных). Для плоских объектов, когда опорный источник также лежит в плоскости объекта, может быть сформирована синтезированная голограмма как угодно больших размеров. Для объемных сцен несовмещение восстанавливаемых изображений возможно уменьшить только посредством увеличения числа выборок участков голографической структуры (уменьшения b_x).

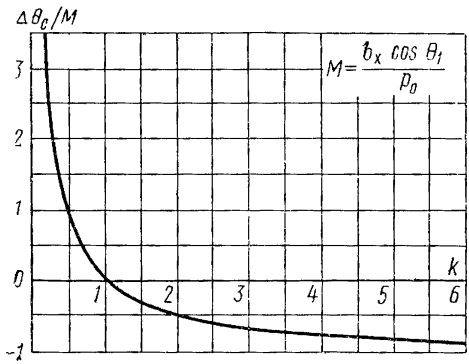


Рис. 3.25. Зависимость некомпенсированного угла $\Delta\theta_c$ (при синтезировании голограммы из одинаковых участков) от относительного расположения опорного и сигнального световых пучков

На рис. 3.26*а* показана синтезированная голограмма, состоящая из восьми одинаковых участков размером 25×45 мм. Наблюдение изображения с каждого отдельно взятого участка возможно только одним глазом, причем ограничения зоны видения имеют место, начиная с $L'_{гол}=40$ см. Объемность сцены воспринимается только монокулярно, т. е. посредством перефокусировки глаза с плана на план.

Наблюдение изображения с синтезированной голограммы, которая имеет горизонтальный размер, равный 200 мм, возможно двумя глазами. Ограничение зоны видения практически отсутствует. Имеется возможность с определенных точек рассматривания видеть объемность воспроизводимой сцены. Действительно, размер участка по горизонтали является базисом съемки сцены $\Delta h_x=25$ мм. При последовательном повторении участка всегда имеется возможность предоставить наблюдателю использовать этот базис наблюдения, обеспечив рассматривание изображения левым глазом с левой части n-го участка и правым глазом с правой части k-го участка. Расстояние от левого края n-го участка до правого края k-го участка должно быть равно главному базису b_0. Для оптимального использования имеющегося базиса съемки необходимо выполнить условие $b_0/\Delta h_x=k-n+1$, где k — целое число.

Очевидно, что при этом имеется возможность предоставить наблюдателю видеть левым глазом изображение, восстанавливаемое с правой части n-го участка и правым глазом с левой части $(k+1)$-го участка, т. е. наблюдать обратный объем. Поэтому при

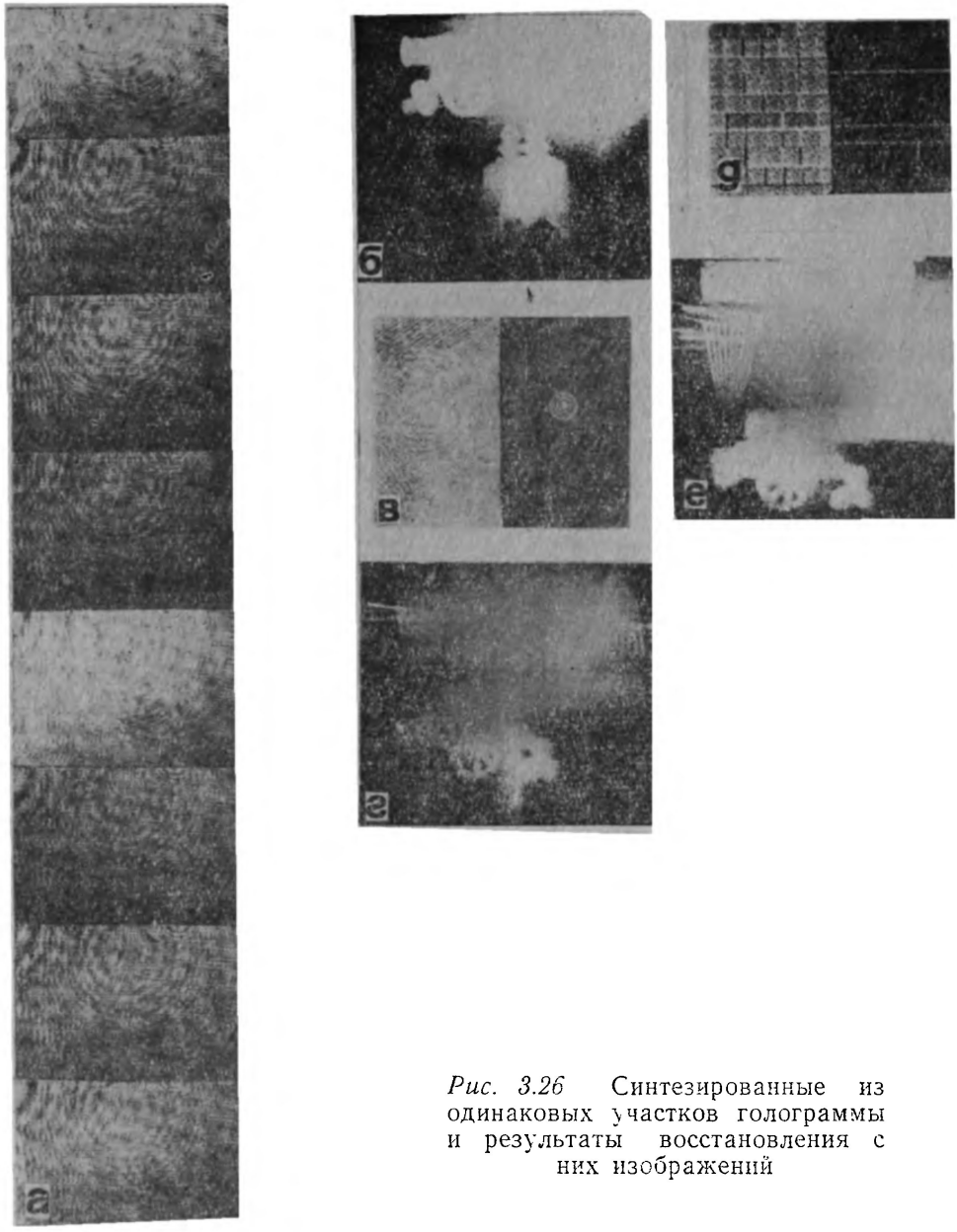


Рис. 3.26 Синтезированные из одинаковых участков голограммы и результаты восстановления с них изображений

рассматривании изображения, восстанавливаемого с голограммы, синтезированной из больших участков, имеет место изменение объемности от правильного до обратного при перемещении наблюдателя относительно голограммы. Однако в среднем этот эффект не сильно ощущается при наблюдении.

Гораздо большее мешающее действие оказывает при перемещении наблюдателя относительно голограммы переход на стыке двух участков от одного ракурса рассматривания сцены к другому, обусловленный большим значением базиса Δh_x. На рис. 3.26*б* показано изображение, восстановленное с двух соседних участков. Фотоаппарат запечатлел одновременно два изображения, восста-

новленных с разных участков. Причем одно из них восстанавливается с правой части левого участка, а другое — с левой части правого участка. Это приводит к смещению переднего плана относительно заднего плана на величину

$$\Delta = \frac{\Delta h_x (p_0 - s_0)}{s_0}. \qquad (3.60)$$

Наблюдатель при перемещении будет видеть скачкообразное перемещение планов сцены Если же он остается неподвижным относительно голограммы, то увидит слитный образ, что определяется условием (3.49) и способностью аппарата зрения сводить два изображения, незначительно отличающихся друг от друга, в единый образ. Анализируя выражение (3.60), замечаем, что угловое смещение планов изображения, для которых $s_0 \neq p_0$,

$$\theta_\Delta = \frac{\Delta h_x (p_0 - s_0)}{s_0 p_0}. \qquad (3.61)$$

Сравнивая это выражение с выражением (3.57), видим, что $\theta_\Delta = \dfrac{\Delta\theta_c}{n_x' \cos\theta_1}$. Следовательно, если синтезирование ведется при заданном допуске на угловое несовпадение изображений $\Delta\theta_{c.доп}$, восстанавливаемых с n_x участков, то условие (3.60) не будет приводить к дополнительным искажениям.

Для иллюстрации этого положения на рис. 3.26 приведены фотографии: *в* — синтезированной голограммы из двух одинаковых участков размером 25×45, *г* — восстановленного с нее изображения, на котором виден сдвиг переднего плана, *д* — синтезированной голограммы из 130 одинаковых участков размером 3,5×3,5 мм, *е* — восстановленного с нее изображения. Из сравнения фотографий *г* и *е* видно, что во втором случае практически отсутствует заметный сдвиг сцены, так как угол θ_Δ уменьшался приблизительно в 7 раз. Рисунки также показывают, что разрешение по изображению, восстанавливаемому с этой голограммы, по крайней мере, не хуже разрешения при восстановлении с голограммы, синтезированной из больших участков. Естественно, что при рассматривании изображения с такой голограммы возможно только монокулярное восприятие его объемности.

Результаты эксперимента по воспроизведению изображений с голограмм, синтезированных из одинаковых участков, подтверждают возможность использования этого метода для устранения ограничений рассматривания. Учитывая результаты эксперимента по передаче голографической информации по телевизионому каналу, можно сказать следующее: этот метод обеспечивает принципиальную возможность построения голографической телевизионной системы, в которой сохраняется некоторое конечное число ракурсов рассматривания изображений. В настоящее время реализация этой возможности ограничена областью систем воспроизведения статических изображений, поскольку для передачи динамических сюжетов отсутствуют способы оптического или электронного размножения участков голограмм с требуемыми скоростями.

4

СТЕРЕОТЕЛЕВИДЕНИЕ И ГОЛОГРАФИЯ

4.1. Общие принципы построения многоракурсных телевизионных систем

Голография открывает новые пути построения объемного телевидения [4.1]. Обратимся к рис. 4.1. На мишени передающей трубки создается голограмма передаваемого объекта с пространственной частотой записи

$$\nu = \frac{\sin\theta}{\lambda}, \tag{4.1}$$

где θ — угол между предметным и опорным потоками лазерных лучей, падающих на мишень; λ — длина световой волны лазера *1*.

Полоса частот, требуемая для передачи голограммы,

$$\Delta F = 2S\nu^2 n, \tag{4.2}$$

где S — площадь голограммы на мишени; n — число кадров в секунду.

На рис. 4.1 дана зависимость $\Delta F = f(S)$ для разных углов θ при $\lambda = 0{,}63$ мкм. На приемной стороне луч лазера *2* модулируют по интенсивности приходящими сигналами и затем развертывают вдоль специальной светочувствительной поверхности, не требующей фотохимической обработки. Так осуществляется реконструкция голограммы. Изображение восстанавливают, освещая голограмму световым потоком от лазера *3*. При использовании в приемнике лазерного кинескопа необходимость в модуляторе и сложных развертывающих устройствах отпадает — когерентный свет с экрана кинескопа объективом непосредственно проецируют на светочувствительную поверхность. При рассматривании восстановленных голограммой мнимых изображений можно не только ощутить глубину пространства, занимаемого объектом, но и оглядеть его с различных сторон. На голограмме записано бесконечно большое число ракурсов. Изменение параллакса можно наблюдать не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлениях.

Однако при реализации голографических телевизионных систем возникает много технических трудностей, связанных с большой информационной емкостью голограмм и высокой удельной плотностью информации (см. гл. 3). В частности, необходимы специальные анализирующие устройства с очень высокой разрешающей спо-

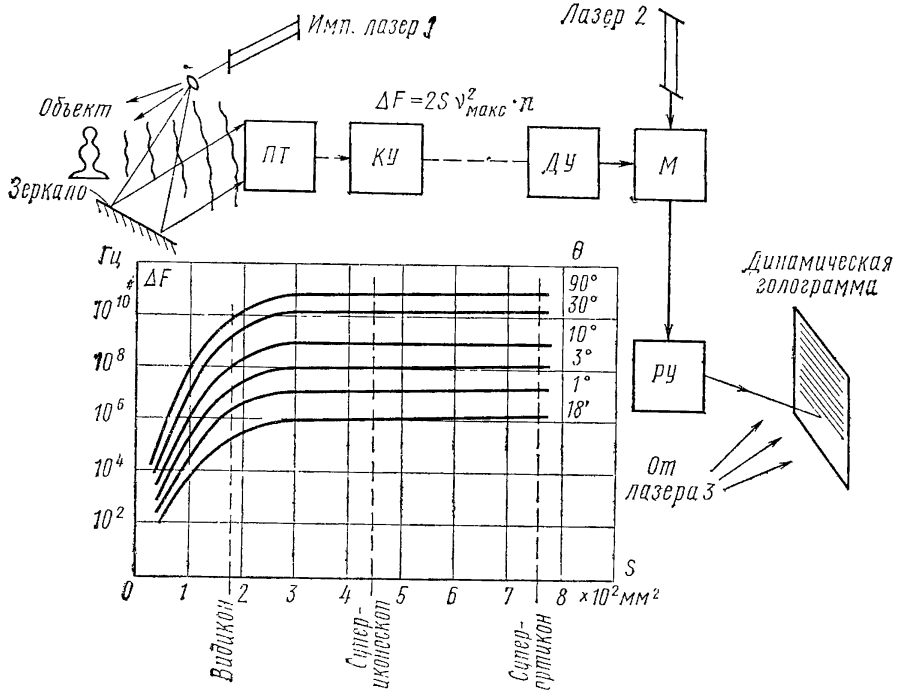


Рис. 4.1. Схема голографической системы телевидения:

ПТ — передающая трубка; КУ — кодирующее устройство; ДУ — декодирующее устройство; М — модулятор, РУ — развертывающее устройство

собностью, сверхширокополосные линии связи (волноводные или оптические) и принципиально новые телевизионные экраны для воспроизведения голограмм.

Вопрос о путях построения голографических телевизионных систем до сих пор еще не решен. Развитие голографического телевидения будет идти, очевидно, в двух направлениях. Одно из них ставит своей целью совершенствование всех звеньев (передающее устройство, канал связи, приемное устройство) для создания голографических телевизионных систем, использующих преимущества голографического метода в полном объеме, а также для телевизионной передачи голограмм уникальных трехмерных объектов. Второе направление заключается в построении промежуточных паллиативных систем, в которых новые качественные параметры пространственных изображений достигались бы не слишком дорогой ценой и которые поэтому могли бы быть реализованы в обозримом будущем.

Пример использования промежуточных систем — это многоракурсные телевизионные системы, где под словом «много» следует понимать несколько десятков или сотен ракурсов [4.2]. Это число является конечным и ограниченным в отличие от голографии, где ракурсы непрерывно переходят друг в друга, т. е. их там бесконечно много как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Однако необходимость обеспечения многих ракурсов в вертикальном направлении является сомнительной, если речь

идет о построении визуальных систем. Действительно, при рассматривании объектов или их объемных изображений мы обычно не смещаемся в вертикальном направлении, а лишь поворачиваем голову влево — вправо или обходим этот объект со всех сторон. Таким образом, информацию о вертикальном параллаксе можно не передавать, а ограничиться только определенным количеством ракурсов по горизонтали. И вполне логично предполагать развитие объемного телевидения именно по такому пути постепенного усложнения от стереоскопических систем с одной стереопарой через многоракурсные системы к голографическим системам с очень большим числом ракурсов.

В таких многоракурсных системах формирование совокупности изображений, отличающихся только горизонтальным параллаксом, целесообразно осуществлять не путем дискретных выборок голограммы, а посредством формирования обычных телевизионных изображений в некогерентном свете, без использования лазеров. В этом случае будет утеряна возможность монокулярного восприятия объема. Эта потеря не столь существенна, так как в стереоскопических системах обычно используется только бинокулярный эффект. В то же время отказ от голографических методов на передающем конце системы дает значительные преимущества. Примерно на один порядок сокращается полоса частот канала связи, так как визуальное разрешение в когерентном свете ухудшается и необходима пространственная фильтрация шумов автоголограммы [4.3]. Но главное достоинство заключается в упрощении передающей части системы: нет необходимости использовать лазеры, отсутствуют проблемы обеспечения виброустойчивости системы, возможны передачи с открытых площадок, а также передачи изображений самосветящихся и движущихся объектов и т. п. Задача сводится к передаче увеличенного числа обычных телевизионных изображений.

Отказ от использования лазеров на передающей стороне системы ни в коем случае не означает полного отказа от голографических методов. На приемной стороне системы, как будет показано далее, эти методы можно и нужно использовать при реализации наиболее важного узла любой многоракурсной системы — селектора ракурсов.

Таким образом, построение голографических телевизионных многоракурсных систем, предназначенных для воспроизведения пространственных изображений, должно основываться на трех положениях:

1) передаче изображений с ограниченным числом ракурсов;

2) формировании совокупности изображений, отличающихся только горизонтальным параллаксом, в некогерентном свете;

3) использовании голографических методов только на приемной стороне системы для селекции ракурсов.

Многоракурсные системы воспроизводят объемные изображения, которые зрители могут наблюдать без специальных очков из большой зоны пространства. Характерной особенностью таких

систем является то, что наблюдатели могут смещаться внутри этой зоны без потери ощущения объемности изображений. Кроме того, появляется возможность взглянуть на боковое изображение предмета, увидеть некоторые предметы и их части, ранее заслоненные другими.

Схема построения многоракурсных систем показана на рис. 4.2. Всю схему можно разделить на несколько частей, функции которых вполне определенны: съемка объекта, передача изображений,

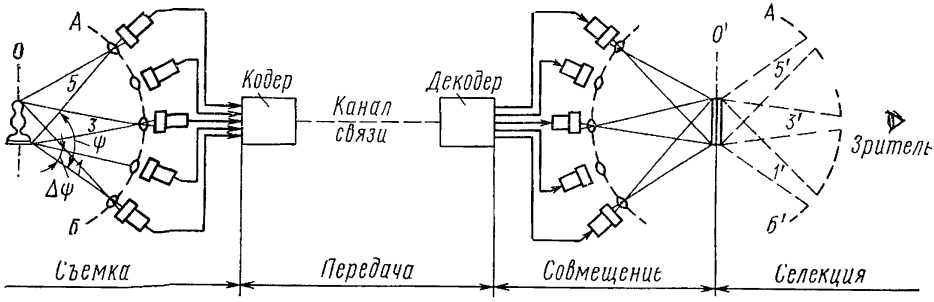


Рис. 4.2. Схема построения многоракурсной телевизионной системы

совмещение изображений, селекция ракурсов. Съемка объекта осуществляется путем размещения по дуге $АБ$ нескольких передающих камер, формирующих телевизионные двухмерные изображения, отличающиеся друг от друга только горизонтальным параллаксом. В статических системах, работающих не в реальном масштабе времени, можно использовать одну камеру, последовательно перемещая ее по дуге $АБ$ на угловые интервалы $\Delta\psi$, характеризующие угловую плотность повторения ракурсов:

$$\Delta\psi = \frac{\psi}{N-1}, \tag{4.3}$$

где ψ — угол бокового обзора объекта совокупностью камер; N — число ракурсов.

Угловая плотность повторения ракурсов является одним из основных параметров многоракурсной системы. Чем она больше, т. е. чем меньше угол $\Delta\psi$, тем большее число ракурсов необходимо передать, однако искажения, связанные с дискретностью выбора информации, будут менее заметны

Обобщая литературные материалы по этому вопросу, в [4.4] сделан вывод о том, что угловая разность точек съемки применительно к стереокино остается примерно постоянной вне зависимости от условий съемки:

$$\psi = \frac{b}{L} \approx \frac{1}{50} \text{ рад} \approx 1^\circ, \tag{4.4}$$

где L — расстояние от объекта до съемочного объектива; b — базис съемки.

При съемке близких предметов базис уменьшается, а удаленные предметы для сохранения пластики необходимо фотографировать

с увеличенным базисом. Приведенная формула по существу является критерием наименьших пространственных искажений при статическом наблюдении одной стереопары и ее можно использовать при расчете многоракурсных систем применительно к «усредненному» наблюдателю, удаленному от экрана на половину глубины зрительного зала. Однако может оказаться, что для обеспечения условий относительно плавного оглядывания пространственных изображений угловая плотность повторения ракурсов должна быть в несколько раз выше приведенного значения, т. е. будет составлять примерно 10—15 угловых минут. Эта величина подлежит экспериментальному уточнению.

Передача совокупности полученных изображений по каналу связи может совершаться одновременно или последовательно. Но требуемая полоса частот канала в обоих случаях будет одинакова и превышать полосу отдельного изображения ΔF_0 в N раз:

$$\Delta F = N \Delta F_0. \qquad (4.5)$$

Предстоит решить проблему сокращения полосы частот [4.5]. Один из способов — передача с сокращенной полосой каких-либо ракурсов из всей совокупности. Это вытекает из опыта работ по стереотелевидению, доказавшего, что изображения стереопары не обязательно должны быть идентичными по четкости и цветовой насыщенности. Здесь уместно напомнить, как была создана система стереоцветного телевидения, требующая в общем случае передачи шести сигналов с общей полосой 39 МГц. Однако оказалось возможным ограничиться четырьмя сигналами с общей полосой частот 6,5 МГц [4.5]. Информация о цветной стереопаре передавалась в виде широкополосного яркостного сигнала $U_{Y\,Л}$ для левого глаза, что определило общую четкость изображения, и трех узкополосных сигналов на поднесущей с квадратурной модуляцией для правого глаза, причем одна из составляющих модулировалась яркостным сигналом $U_{Y\,П}$, а другая — цветоразностными $U_{(R-Y)П}$ и $U_{(B-Y)\,П}$ через строку (рис. 4.3).

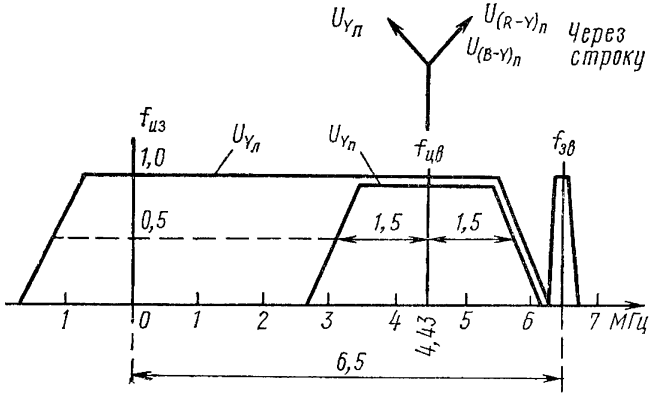


Рис. 4.3. Спектры сигналов стереоцветной системы ЛЭИС

Элементы приемной стороны многоракурсной системы (см. рис. 4.2) выполняют, в основном, две четко разграниченные функции — совмещение изображений и их пространственную селекцию. Плоскость совмещения O' совокупности плоских изображений, отличающихся горизонтальным параллаксом, соответствует плоскости O в предметном пространстве. При одновременной передаче изображений используется число телевизионных проекторов, равное числу частичных изображений панорамы, а при последовательной передаче все изображения поочередно высвечиваются на экране одного и того же проектора.

Наиболее важной функцией, характерной для любой системы воспроизведения объемных изображений, является пространственная селекция ракурсов. Диффузно рассеивающая плоскость совмещения изображения O' в оптическом отношении является как бы двумерным многоракурсным аналогом объекта и, как и объект, рассеивает свет во все стороны Задача селектора состоит в том, чтобы из рассеянной экраном световой волны оставить и довести до зрителя только определенную ее часть, пространственно соответствующую тому конусу лучей, который захватывается апертурой одного из объективов на передающей стороне (1—1′, 3—3′, 5—5′ и т. д.). Такая селекция может осуществляться как непосредственно вблизи плоскости совмещения O', так и на некотором удалении от нее в пространстве (дуга $А'Б'$), соответствующем месту расположения передающих объективов (дуга $АБ$). Однако в любом случае воспроизводимые на приемной стороне с помощью селектора конусы лучей (1′, 3′, 5′) должны быть геометрически подобны конусам лучей, сходящимся на съемочных объективах (1, 3, 5). Размер изображения может быть меньше или больше самого объекта, однако угол обзора при этом не должен изменяться.

4.2. Методы пространственной селекции ракурсов

Общие сведения

Тип многоракурсной системы определяется, в основном, способом технической реализации ее наиболее специфического узла — селектора ракурсов. Он может строиться на основе известных методов разделения левого и правого изображений в бинокулярных стереоскопических системах. Наиболее известна растровая селекция ракурсов. Возможно построение обтюрационного селектора ракурсов типа бегущей щели. В последнее время исследуются возможности применения для этой цели голографических методов. При этом необходимо иметь в виду, что существенной особенностью многоракурсных систем является использование автостереоскопического воспроизведения изображений, заключающегося в том, что функции индивидуальных приборов разделения изображений выполняет устройство, общее для всех зрителей и пространственно удаленное от них.

Принципиальной основой для построения многоракурсных систем могут служить известные методы интегральной фотографии [4.6] в разумном сочетании с возможностями голографии. Каждый элементарный участок голограммы содержит информацию об объемности объекта, которая определяет монокулярное восприятие объема. Однако рельефность визуально наблюдаемых мнимых изображений обеспечивается, в основном, за счет бинокулярного зрения. Поэтому в отдельных случаях, например при проектировании вещательных систем, могут быть использованы принципы воспроизведения интегральных пространственных изображений, когда отдельные изображения не содержат информацию об объеме. Передающая часть значительно упрощается, а возможности ее применения возрастают Задача состоит в том, чтобы получить серию двумерных изображений, отличающихся только горизонтальным параллаксом, передать их по каналу связи и на основе этой информации получить интегральное пространственное изображение, которое можно оглядывать.

Многоракурсные системы являются в известном смысле частным «крупноструктурным» случаем интегральной фотографии, изобретенной Г. Липпманом в 1908 г. и основанной на суммировании (интегрировании) пространственного изображения из большого числа плоских изображений. Множество микроскопических изображений на одной светочувствительной поверхности (рис. 4.4)

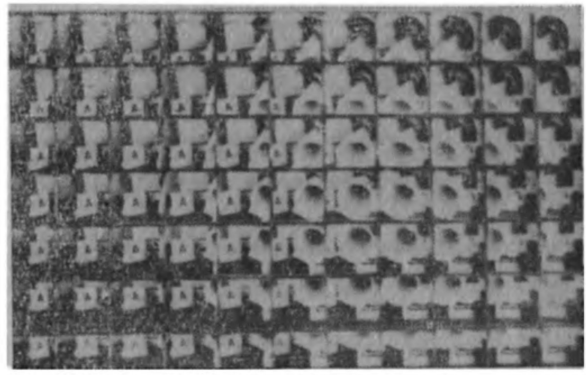


Рис. 4.4. Совокупность плоских изображений интегральной фотографии

получают с помощью многолинзовой мелкоструктурной оптической системы типа пчелиный глаз (пчелиный глаз имеет фасеточное строение — купол, поверхность которого состоит из множества круглых крошечных линз) [4.10]. Изображения отличаются между собой точками съемки и имеют поэтому разные параллактические сдвиги. Процессы записи и воспроизведения пространственных изображений иллюстрируются рис. 4.5 [4.7]. После экспозиции светочувствительной поверхности через фасеточный объектив и ее фотохимической обработки получают негатив. Позитивные изобра-

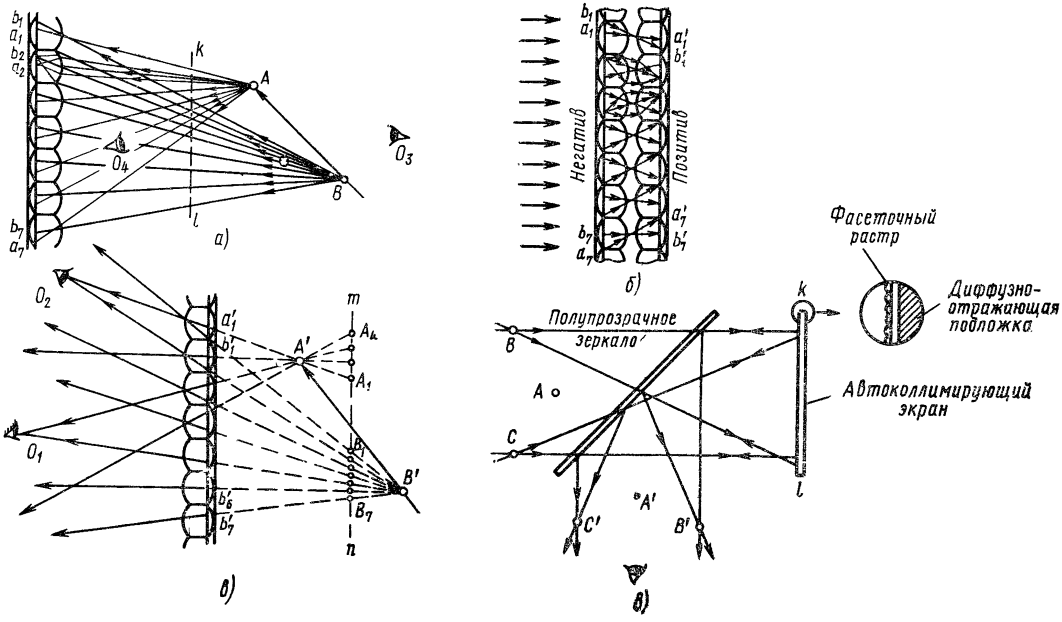


Рис. 4.5. Получение интегрального объема:
а — схема съемки; *б* — копировка позитива; *в* — наблюдение пространственного изображения; *г* — получение из псевдоскопического изображения ортоскопическое с помощью автоколлимирующего экрана

жения получают путем использования еще одной фасеточной оптической системы. Это необходимо для того, чтобы компенсировать оптическую инверсию изображений при фотографировании. Воспроизведение изображений осуществляют путем засветки позитива со стороны пленки. Наблюдение ведется со стороны линзочек. Каждая из них воспроизводит двумерное изображение в плоскости *mn*. Какое-то одно плоское изображение и будет попадать в глаз наблюдателя, если его поле зрения ограничить одной линзочкой, когда он вплотную приблизится к ней. В общем случае наблюдение ведется на некотором удалении от интегральной фотографии (рис. 4.5*в*, позиции O_1 и O_2). Поэтому глаз будет видеть составное плоское изображение, синтезированное из отдельных маленьких участков. Прерывистость такого растрового изображения заметна не будет вследствие малого изменения точки съемки смежных изображений. Перемещение глаза наблюдателя будет приводить к изменению параллакса, однако пространственность воспроизводимых изображений будет, в основном, определяться бинокулярным эффектом за счет одновременного наблюдения левым и правым глазами разных изображений.

Одним из неудобств описанного процесса является необходимость оптического инвертирования изображения при получении позитива, что усложняет дело. Более удобно было бы использовать при записи и воспроизведении изображений одну и ту же светочувствительную поверхность (конечно, при условии получения там позитива непосредственно при съемке). Однако при ее освещении световая волна со стороны линзочек получается сходящейся, образуя действительное псевдоскопическое изображение (все лучи на рис. 4.5*а* будут идти в обратном направлении). Оно является точной оптической копией объекта, однако многолинзовая пластина «видела» его с одной стороны, а наблюдатель (точка O_3) смотрит на изображение этого объекта с противоположной стороны. Поэтому изображение получится объемным, но с обратным рельефом: ближние к фасеточному объективу точки объекта будут казаться удаленными и наоборот; левые и правые стороны объекта также поменяются местами. Наблюдать действительное изображение со стороны линзочек (точка O_4) с целью воспроизведения правильного рельефа нельзя, чтобы не перекрыть часть лучей, да и к тому же они и направлены не к наблюдателю, а от него. Таким образом, условия для наблюдения могут быть созданы, если пространственно разделить (например с помощью полупрозрачного зеркала) проекцию изображений и их наблюдение, а световые лучи заставить повернуть в обратную сторону, на 180° (рис. 4.5*г*). Это можно сделать с помощью автоколлимирующего экрана *kl*, отражающего лучи в том же направлении, по которому они пришли [4.6]. Автоколлимирующий экран может быть выполнен, например, из материала типа «катафот», состоящего из множества микроскопических стеклянных шариков на металлической подложке, или путем наложения мелкоструктурного оптического растра любого типа на диффузно отражающий экран.

Лунный ландшафт, например, тоже является своего рода коллимирующей поверхностью, так как мелкозернистый материал поверхностного слоя Луны содержит много оплавленных шариков и поэтому имеет очень узкую индикатриссу рассеяния, т. е. Луна в оптическом отношении является гигантским шаровым катафотом. Вместо автоколлимирующего экрана сходящуюся световую волну можно записать на голограмму, расположив в плоскости kl светочувствительную поверхность и осуществляя проекцию (и эталонную подсветку) в когерентном свете. Используя при воспроизведении сопряженную опорную волну, можно получить исходную предметную волну, только распространяющуюся в нужном нам противоположном направлении, т. е. расходящуюся. В работе [4.8] утверждается, что именно в таком сочетании методов интегральной фотографии и голографии заключается будущее высококачественной трехмерной фотографии. Сам процесс фотографирования через фасеточный объектив в этой работе назван «голокодированием», а получающаяся мозаика изображений — «голокодером». О ведущихся экспериментальных работах в этом направлении и, в частности, о возможности использования в качестве фасеточного объектива зарегистрированной интерференционной картины взаимодействия четырех перекрывающихся когерентных пучков упоминал грузинский ученый Ш. Д. Какичашвили, участвовавший в работе II Всесоюзной школы по голографии в 1970 г.

Этот метод при ограниченном числе линзочек может быть использован и в телевидении [4.9]. Пусть по каналу связи передают не голограммы, а просто сфокусированные изображения объекта (стрела и точка на рис. 4.6*а*) в обычном свете, отличающиеся только горизонтальным параллаксом. На приемном конце кадры изображения, сформированные любой светоклапанной системой, проектируются через аналогичную оптическую систему, но уже с использованием источника когерентного света (рис. 4.6*б*). На выходе каждого объектива восстанавливается волновой фронт, отличие которого от исходного состоит в отсутствии исключенной на передающей стороне информации о «физическом» объеме. Воспроизводимые изображения фокусируются в одной плоскости и имеют различный параллакс (точки проектируются на разные участки стрелы). Если за оптической системой поместить фото или фотохромную пленку и завести на нее эталонный фон, то можно сформировать голограмму. Она позволит оглядывать изображения объемных объектов, как и обычная голограмма, так как содержит определенное число записанных ракурсов. Объемность наблюдаемого изображения обеспечивается только благодаря бинокулярному зрению.

В качестве когерентного фона при записи голограммы берется сходящийся пучок, падающий на светочувствительную поверхность с той же стороны, что и записываемый волновой фронт — со стороны объективов. Тогда при воспроизведении можно использовать точечный источник когерентного света, расположенный в точ-

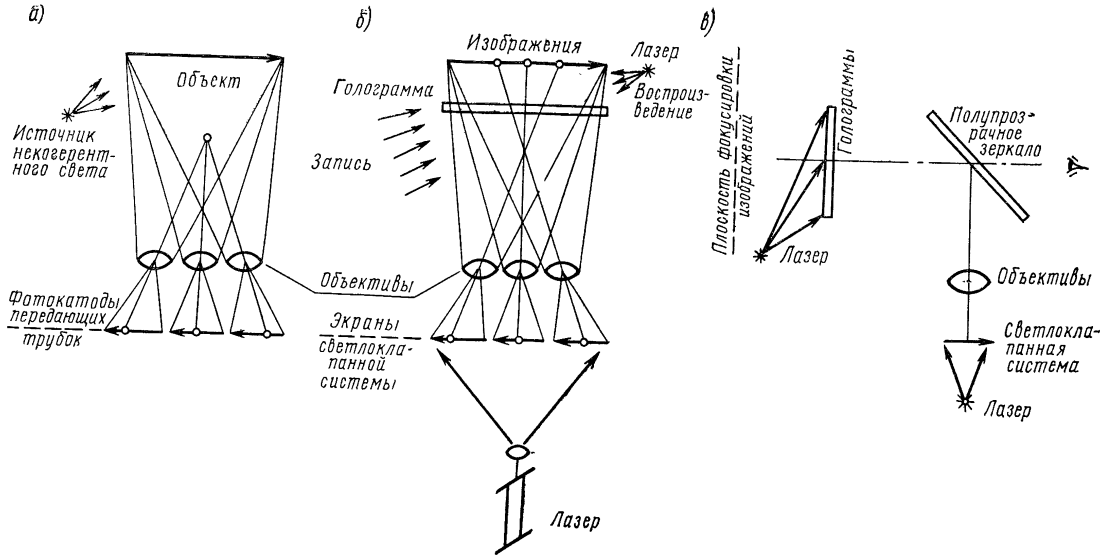


Рис 4 6. Формирование (*а*), запись и воспроизведение (*б*, *в*) совокупности изображений

ке фокусировки записывающего пучка, т. е. с противоположной внешней стороны голограммы. Восстановленный волновой фронт будет казаться исходящим из плоскости фокусировки изображений. Наблюдение производится из плоскости расположения объективов.

Если запись и воспроизведение должны происходить одновременно, плоскости наблюдения и расположения объективов могут быть пространственно разделены полупрозрачным зеркалом (рис. 4.6*в*).

Подобную голограмму принципиально можно получить как угодно большой; это определяется числом и размером выбранных оптических элементов. При этом один и тот же ракурс воспроизводится на участке голограммы, соизмеримом с апертурой одной линзы. Следовательно, проблема синтеза (мультиплицирования) голограмм здесь решается автоматически.

Сколько нужно передавать изображений, скажем, два или пятьдесят и в какой полосе, зависит от назначения проектируемой системы и числа наблюдателей. Однако безусловно ясно, что для вещательных целей одного ракурса по вертикали вполне достаточно, а период их повторения по горизонтали может видоизменяться в широких пределах от нескольких миллиметров до 6 см.

Использование на приемной и передающих сторонах одинаковых оптических систем предполагает, что интегральное пространственное изображение принципиально может быть воспроизведено и без голографических методов. Автоколлимирующий экран, роль которого в рассматриваемой системе, по существу, выполняет голограмма, будет не нужен, если при съемке использовать анаморфотную оптику, при которой не происходит оптической инверсии изображений, а линзовые элементы на приемной стороне будут иметь обратную кривизну. Подобная многоракурсная телевизионная система описана в работе [4.10].

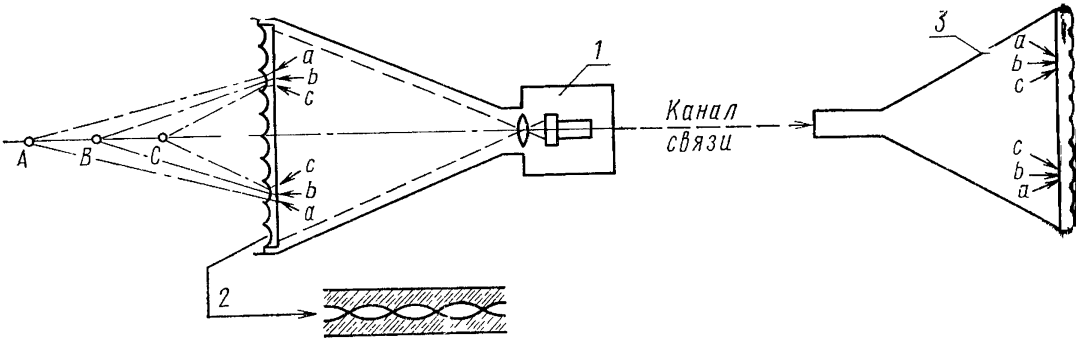


Рис. 4.7. Построение телевизионной многоракурсной системы, основанной на использовании принципов крупноструктурной интегральной фотографии:
1 — передающая телевизионная камера; *2* — анализирующий линзовый растр с вогнутыми линзами, *3* — кинескоп; *4* — линзовый растр с выпуклыми линзами

Между сюжетом и объективом камеры *1* расположен анализирующий растр *2* с вертикальными вогнутыми цилиндрическими линзами, которые могут также образовываться двумя внутренними вогнутыми и защищенными от пыли поверхностями (рис. 4 7). Через него объект виден напросвет. Каждый линзовый элемент совместно с короткофокусным объективом формирует на фотокатоде передающей трубки четкое изображение отдельного ракурса, не перевернутое и

сжатое с боков (рис. 4.8). Хорошая четкость изображений сохраняется для переднего плана объекта глубиной в несколько метров; расфокусировка изображений более удаленных предметов, объемность восприятия которых снижается, не имеет значения. Наружный прочный каркас служит для сохранения постоянства расстояния между растром и объективом камеры и устранения внешних засветов. Сам растр представляет собой пластмассовую (из акрилидной смолы) пластинку, линзовые элементы которой получены путем фрезерования или литья под давлением. Кинескоп *3* снабжен аналогичным оптическим устройством *4* с выпуклыми цилиндрическими линзами, через которые и наблюдается воспроизводимое электронным лучом составное изображение. Каждое частичное изображение отличается от другого горизонтальным параллаксом, однако хорошо согласуется с ним и не дает прерывистости воспроизводимых линий при достаточно большом числе линзочек.

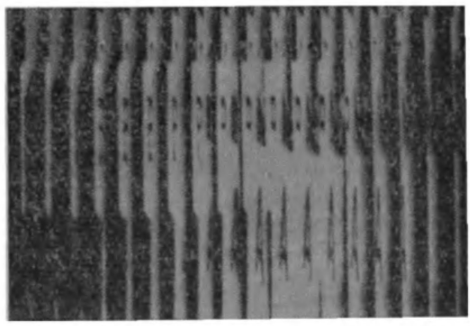


Рис. 4.8. Составное изображение, формируемое с помощью анализирующего растра с вертикальными вогнутыми цилиндрическими линзами

Анализирующий растр должен быть возможно бо́льших размеров; в качестве примера приводятся следующие данные растр размером 80×60 см состоит из 80 вертикальных элементов шириной 10 мм каждый. Число элементов строки, приходящееся на долю каждого частичного изображения, будет уменьшаться пропорционально увеличению числа линз. Поэтому хорошее разрешение по горизонтали в этой системе получить трудно. Требования к линейности горизонтальной развертки здесь также очень высокие.

Вертикальный линзовый растр

Каждый элемент светосильной вертикальной растровой системы работает как самостоятельный объектив, формирующий свое частичное изображение. Все изображения на фотокатоде передающей трубки располагаются рядом друг с другом. Однако растр обычно используется в другом режиме работы, когда проектируемые на него с помощью оптических систем изображения фокусируются линзовым элементом в виде точки на полупрозрачном рассеивающем экране *S*, расположенном позади растра на расстоянии фокусного расстояния от него (рис. 4.9*а*). Размер точки значительно меньше апертуры самой полуцилиндрической короткофокусной линзочки, поэтому она может зарегистрировать несколько (до десяти) таких точек от разных изображений. Поскольку растр вертикальный, то «разрешенные» зоны для размещения совокупности точек от каждого изображения будут представлять собой вертикальные полоски, расположенные рядом друг с другом, период повторения которых равен ширине одного оптического элемента. Такая получаемая за оптическим растром панорамограмма, состоящая из перемежающихся вертикальных полосок совокупности изображений, отличающихся горизонтальным параллаксом, называется параллакс-панорамограммой или кодированным изображением (рис. 4.10 [1]).

[1] Фотография предоставлена И. А. Осиповым.

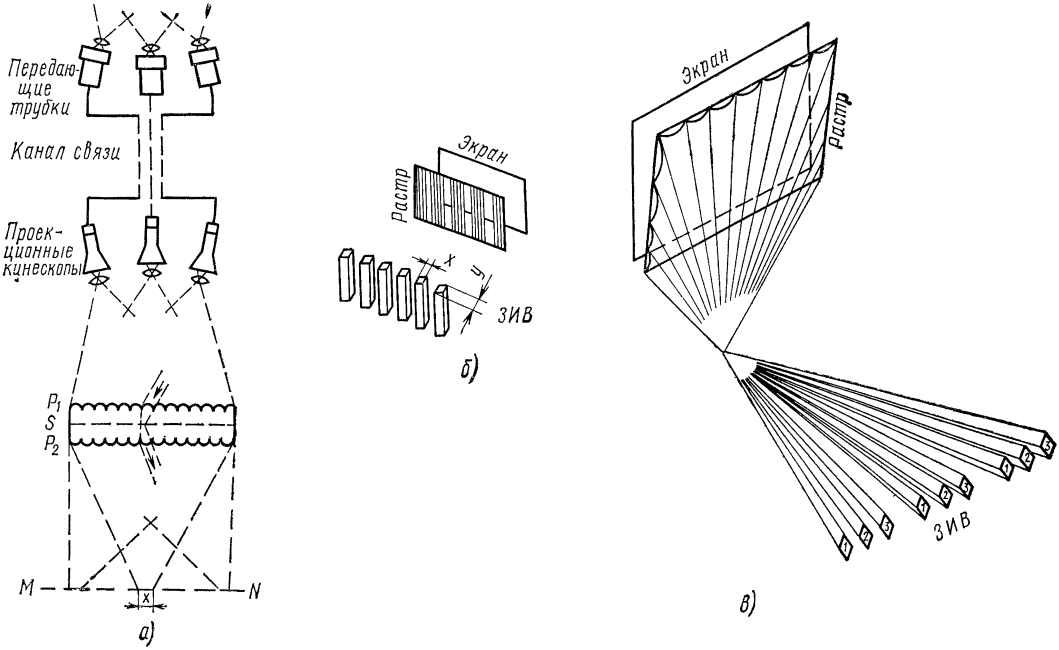


Рис. 49. Использование вертикальных линзовых растров для сепарации изображений: *а* — ТВ многоракурсная система, использующая растры для формирования панорамограммы (растр P_1) на матовом экране *MN* и сепарации изображений (растр P_2) в плоскости избирательного видения; *б* — форма зон избирательного видения (ЗИВ) для линейного параллельного растра; *в* — *ЗИВ* для радиального растра

Размеры линзовых элементов должны быть малыми, чтобы растровая структура не мешала восприятию пространственных изображений, а фокусное расстояние — минимальным для повышения емкости растрового экрана.

Для пространственной селекции изображений отдельных ракурсов световые лучи от кодированного изображения в плоскости диффузно-рассеивающего экрана должны второй раз пройти через оптический растр, аналогичный растру при кодировании. Таким образом, зрители через оптический растр должны рассматривать непосредственно кодированное изображение. Из рис. 4.11*а* видно, что световые лучи от всех элементарных штрихов кодированного изображения каждого ракурса (их на рисунке три), проходя через второй оптический растр, собираются в определенной точке схода, в которой и образуется зона избирательного видения ЗИВ изображения данного ракурса.

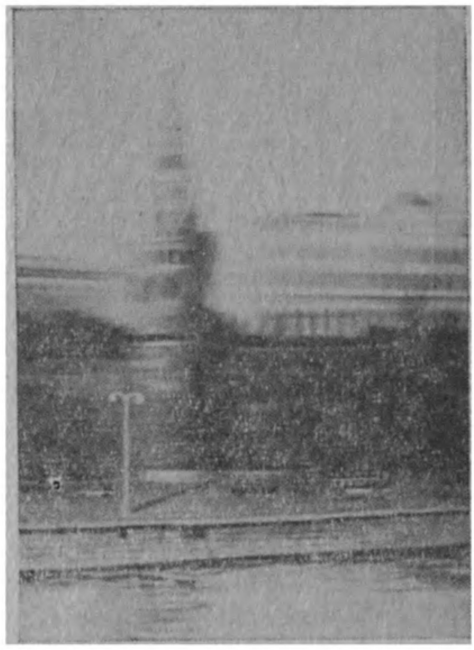


Рис. 4.10. Параллакс-панорамограмма

Эта зона в горизонтальной плоскости представляет собой неправильный ромб и определяется местом пересечения световых лучей, идущих от всех штрихов кодированного изображения этого ракурса (рис. 4.11 *б*). Для определения границ зоны достаточно рассматривать пересечения световых лучей, идущих только от крайних штрихов кодированного изображения. Ширина зоны определяется параметрами оптического растра и проекционного объектива и их взаимным расположением.

Возможный вариант многоракурсной телевизионной системы с использованием линейной линзово-растровой системы приведен на рис. 4.9*а* [4.10, 4.11]. Съемка объекта производится с помощью нескольких передающих камер (на рисунке показано три), смещенных друг относительно друга по горизонтали. Видеосигнал тем или иным путем передается по каналу связи и подается на проекционные кинескопы приемного устройства. Изображения с экранов кинескопов с помощью объективов проецируются в плоскость растра, образуя на его полупрозрачном рассеивающем экране параллакс-панорамограмму, состоящую из чередующихся вертикальных полосок отдельных изображений. С другой стороны экрана вплотную к нему расположен аналогичный растр, задача которого состоит в правильной расшифровке, полученной первым растром параллакс-панорамограммы. При правильном симметричном расположении обоих растров относительно экрана в верти-

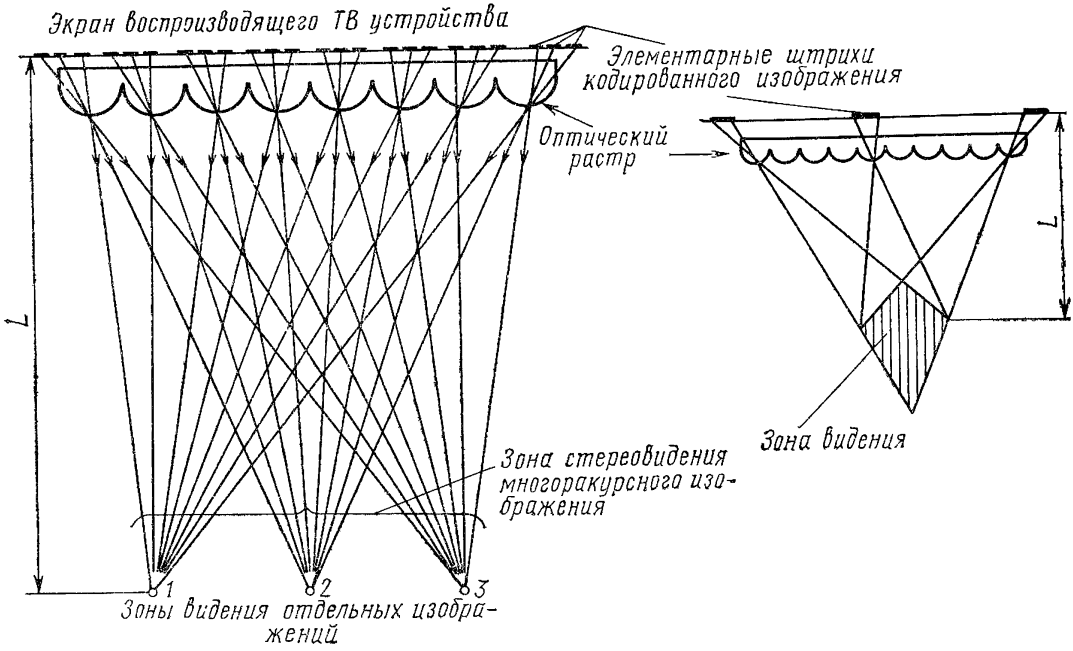


Рис 4.11. Образование зон видения отдельных изображений

кальной плоскости избирательного видения *MN* образуются узкие вертикальные зоны избирательного видения шириной *x*, в которые направляются лучи от полосок стереограммы только какого-то одного «своего» изображения. В каждую точку этой зоны приходят лучи от всех точек одного изображения и обратно — каждая точка изображения освещает всю зону. Пространственная форма зон избирательного видения для линейного параллельного растра приведена на рис. 4.9*б*, а для радиального растра с переменным по высоте шагом оптических элементов, обеспечивающим горизонтальное положение плоскости избирательного видения (для удобства размещения зрителей) — на рис. 4.9*в*. В промежутках между указанными зонами изображения также будут наблюдаться, однако там имеются перекрестные искажения между смежными ракурсами, т. е. просматриваются сразу два изображения. Поэтому эти участки называют зоной помех.

Интегральный объем получается вследствие бинокулярного наблюдения совокупности плоских изображений. При горизонтальном смещении наблюдателя он может взглянуть на изображение с другой точки зрения, что придает пространственному изображению естественность (пропадает кулисность). Если такие смещения допустить относительно небольшими, то можно ограничиться небольшим числом ракурсов (например девятью, как было в проводящихся в НИКФИ экспериментах).

В то же время, в силу множительных свойств оптического растра в пространстве перед растровым стереоэкраном происходит многократное повторение по горизонтали зоны видения изображения одного ракурса и, следовательно, зоны стереовидения (см.

рис. 4.9*б*, *в*). Это объясняется тем, что световые лучи от каждого элементарного штриха кодированного изображения одновременно проходят через несколько соседних линзочек оптического растра.

Параллакс-панорамограммное воспроизведение интегрального изображения и растровый метод воспроизведения стереоскопических изображений основаны на одних и тех же принципах и, по существу, отличаются только количеством используемых частичных изображений (параллакс-стереограмма является частным случаем параллакс-панорамограммы при использовании только двух изображений). Для получения стереоцветного изображения растровым способом необходимо как левое, так и правое изображения воспроизводить на трех проекционных кинескопах. Могут быть использованы кинескопы типа 6ЛК2А, 6ЛК2И и 6ЛК2П, имеющие соответственно синий, зеленый и красный цвета свечения люминофора или кинескопы типа 6ЛК2Б с соответствующими светофильтрами. Для повышения яркости изображений и увеличения площади экрана вместо проекционных кинескопов целесообразно использовать лазеры.

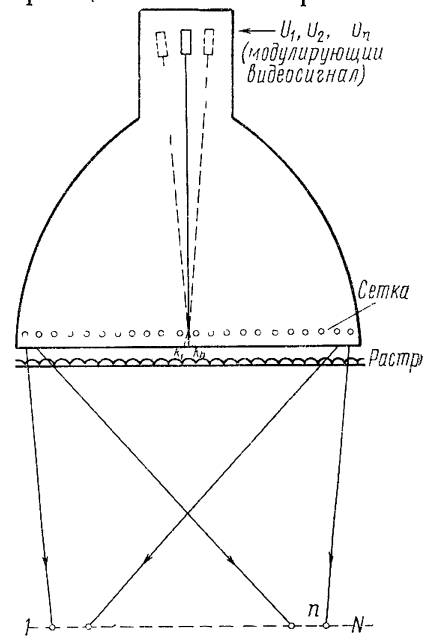


Рис. 4.12. Получение многоракурсного изображения с помощью одного кинескопа

Стереограмма может формироваться не только на приемном, но и на передающем конце системы оптическим или электронным путем. Основная трудность заключается в точности совмещения переданной по каналу связи и поэтому подвергнутой нелинейным искажениям стереограммы с неподвижной структурой линзового растра. Однако формирование стереограммы непосредственно на приемной стороне не свободно от недостатков; например, имеет место сложность системы (число приемных телевизионных трубок равно числу ракурсов).

Заслуживает внимания использование для этой цели одной приемной электроннолучевой трубки [4.11]. В частности, простейшие стереограммы, состоящие из трех частичных изображений, можно формировать с помощью современных электроннолучевых трубок (хроматрон, индексный кинескоп, трубка с фокусирующей сеткой, трубка с теневой маской). Дальнейшая модернизация позволит увеличить число используемых ракурсов путем усложнения конструкции кинескопа и установки многих разнесенных по горизонтали прожекторов при использовании каждого из них для воспроизведения нескольких изображений. Расположенная перед экраном сетка (рис. 4.12) образует совокупность (растр) электрооптических короткофокусных линзочек, фокальными плоскостями которых является экран. В результате каждое частичное изображение на экране кинескопа оказывается разрезанным на вертикальные полоски, вложенные (вшихтованные) друг в друга. При этом период повторения группы полосок k_1—k_n равен размеру одного элемента изображения. Селекция ракурсов

как и обычно, осуществляется путем помещения непосредственно перед экраном трубки линзового растра, обеспечивающего наблюдение объемных изображений в плоскости избирательного видения *MN*. Хорошо было бы поместить линзовый растр внутри трубки, такая технологическая задача уже ставится.

Голографический растр

При реализации растровой селекции ракурсов возникают большие трудности, связанные с точностью совмещения растра с параллаксограммой, сложностью ее получения и другими причинами. Поэтому в последнее время были сделаны предложения по использованию для селекции ракурсов голографических растров [4.2, 4.12—4.14]. Суть их сводится к тому, чтобы пространственно разнесенные конусы лучей, которые формирует растр, наложенный на параллаксограмму, получить путем избирательной записи световых потоков на голограмме, расположенной в плоскости избирательного видения *MN*.

Возможный вариант построения приемной части многоракурсной голографической телевизионной системы показан на рис. 4.13. Совокупность изображений последовательно воспроизводится на экране светоклапанной системы типа «Скиатрон» или «Эйдофор», который служит носителем изображения. Экран просвечивают

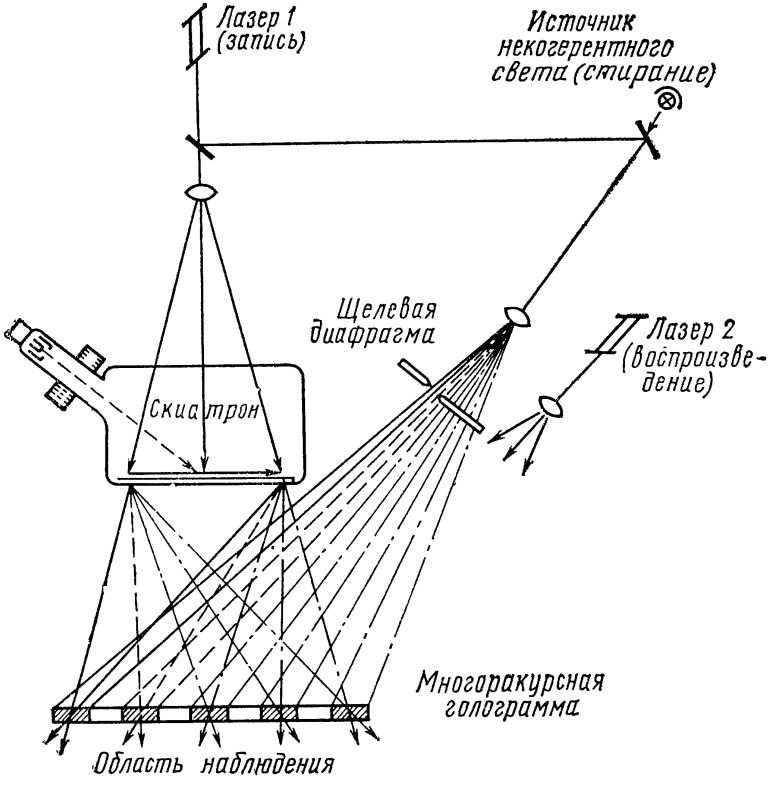


Рис. 4.13. Построение приемной части многоракурсной голографической телевизионной системы

расходящимся пучком когерентного света, излучаемого лазером *1*. В пространстве за экраном помещают светочувствительную поверхность, позволяющую многократно и быстро осуществлять перезапись интерференционной структуры без фотохимической обработки, например фотохромное стекло или пленку. Рассеянный экраном когерентный свет от каждого частичного изображения освещает всю светочувствительную поверхность. Часть этой же поверхности в виде узкой вертикальной полосы одновременно засвечивают эталонным пучком когерентного света, формируемым от лазера *1* с помощью полупрозрачных зеркал, линз и щелевой диафрагмы и получают голограмму как результат интерференции двух световых потоков. Расположение этой полосы относительно воспроизводимых изображений на диффузно рассеивающем экране все время меняют, чтобы она соответствовала позиции съемки данного изображения, т. е. в момент воспроизведения на экране изображения от левого объектива передающей оптической системы когерентный фон должен падать только на левую вертикальную полоску формируемой голограммы, от среднего объектива — на среднюю полоску и т. д. Этого достигают путем изменения положения щелевой диафрагмы синхронно и синфазно со сменой изображений. Возможно использование неподвижной диафрагмы и вращающегося зеркального барабана. Таким образом получается голографический растр — динамическая составная многоракурсная голограмма, которую располагают, однако, не в плоскости совмещения изображений, как оптический растр, а в плоскости избирательного видения.

Лазер *1* излучает когерентный ультрафиолетовый свет, в котором и осуществляют запись голограммы последовательно для всех полос светочувствительной поверхности — именно в те интервалы времени, когда происходит проекция на рассеивающий экран «своего» ракурса.

Процессу записи для каждой полосы предшествует стирание записанной ранее информации путем кратковременного освещения этой полосы некогерентным источником света длинноволновой, красной части видимого участка оптического диапазона. Заключительный процесс воспроизведения изображений осуществляют путем непрерывного освещения всей состоящей из полосок голограммы расходящимся пучком когерентного света средневолновой, зеленой части спектра, излучаемого лазером *2*.

Любой участок голограммы будет экспонироваться не только «своим», но и «чужим» изображением. Но поскольку в это время эталонный луч будет отсутствовать, то эта засветка зафиксируется лишь в интерференционных узорах типа «автоголограмм» и принципиально может быть отфильтрована соответствующим выбором схемы.

Применение для селекции изображений голографического растра потребует разработки фотохромных материалов с высоким быстродействием (сотни циклов перезаписи в секунду) и большим сроком работы, улучшения параметров светоклапанных

устройств (инерционность, разрешающая способность) и использования довольно сложной системы коммутации источников света. Кроме того, не совсем ясны пути реализации на этой основе цветных систем.

Ширина каждой полоски h (рис. 4.14), размер голограммы H и число ракурсов N определяется глубиной зрительного зала L. Расстояние l между экраном и голограммой выбирается так, чтобы угол, стягиваемый экраном на голограмме, был равен углу съемки, т. е. углу, под которым виден передаваемый сюжет из плоскости формирования изображения на передающем конце. Наихудшие условия наблюдения, из которых необходимо исходить при расчете, будут для наблюдателей, находящихся в конце зрительного зала. Чтобы стереоэффект сохранялся и для них, при рассматривании наиболее близкой точки пространственного изображения (примем, что она лежит в плоскости экрана) необходимо выполнить условие $h \leqslant x$. В этом случае каждый глаз наблюдателя будет рассматривать искомую точку через разные, хотя и соседние полоски многоракурсной голограммы, т. е. информация о параллаксе еще не будет утеряна.

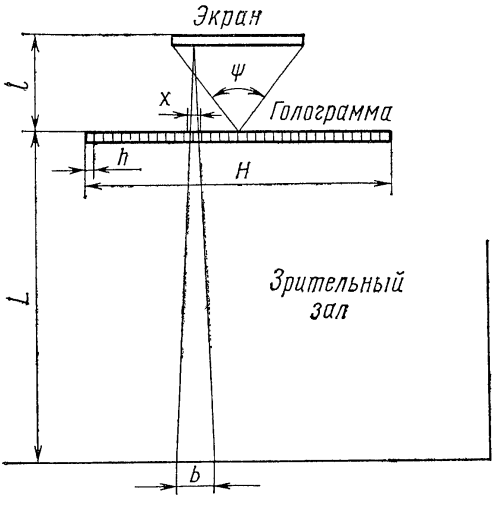


Рис. 4.14. К расчету многоракурсной голограммы

Расстояние x связано с остальными параметрами системы соотношением $b/(l+L)=x/l$, где b — базис наблюдения. Пусть $b=6$ см, $l=1$ м и $L=5$ м. Тогда

$$h \leqslant x = \frac{bl}{l+L} = \frac{6 \cdot 100}{100+500} = 1 \text{ см}.$$

Ширина вертикальных полосок не должна в этом случае быть больше 1 см. Для формирования многоракурсной голограммы, например размером в 1 м, число ракурсов $N=H/h=100/1=100$. При заданном числе ракурсов максимальный размер голограммы, который нам удастся сформировать, составит $H=hN$.

Следует также заметить, что при оглядывании пространственных изображений через такую голограмму наблюдатель будет ощущать определенное рассогласование смежных участков изображения и дискретные «скачки» ракурсов. Чем выше частота повторения ракурсов, тем меньше заметны эти искажения. Пороговая величина должна быть определена экспериментально. Таким образом, при определении максимально возможной ширины каждой полоски голограммы из двух критериев (глубина зрительного зала и «скачки» ракурсов) необходимо будет пользоваться более критичным.

В прикладных системах многоракурсная голограмма формируется с целью дальнейшего изучения записанной информации, а не только для мгновенной демонстрации, как в вещании. Примером могут служить получение пространственных изображений внутренних органов человека на основе серии двумерных рентгеновских снимков; получение рельефных изображений ландшафта планет при использовании совокупности переданных с космического корабля фототелевизионных изображений и т. д. При таком «статическом» методе формирования используется лишь одна совокупность изображений и сменяются они как угодно медленно. Можно использовать обычные светочувствительные материалы с высоким разрешением. В этом случае необходим один источник когерентного света, а совокупность двухмерных изображений может представлять собой как серию телевизионных изображений, так и набор фотографий (рис. 4.15).

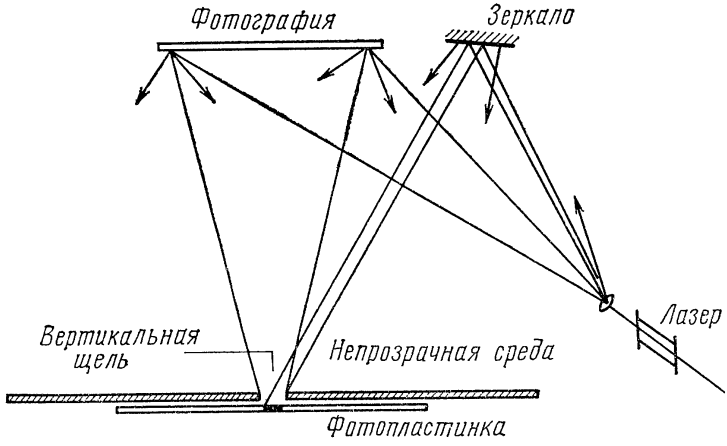


Рис. 4.15. Получение многоракурсной голограммы из серии фотографий

Последовательность сменяемых фотографий заданных размеров, отличающихся только горизонтальным параллаксом, освещают расходящимся пучком когерентного света. Отраженный от них свет воздействует на обычную фотопластинку с высоким разрешением, перед которой устанавливают щелевую диафрагму. Через эту же щель открытую часть светочувствительной полосы освещают эталонным когерентным светом, формируемым с помощью зеркала из части светового потока, освещающего фотографии. При каждой смене фотографии диафрагму сдвигают относительно фотопластинки на расстояние, равное ширине щели. После фотохимической обработки полученную многоракурсную, состоящую из полосок голограмму всю одновременно освещают когерентным светом и получают интегральное пространственное изображение.

Использование трех лазеров основных цветов — красного R, зеленого G и синего B и объемных светочувствительных эмульсий — позволяет изготовить многоракурсные голограммы, которые

будут восстанавливать цветные пространственные изображения в белом свете [4.15]. При учете этой особенности может оказаться, что задача изготовления рельефных открыток будет решаться более просто именно в этом «голографическом» направлении — многоракурсная голограмма вместо растровых изображений, совмещаемых с параллельным оптическим растром.

Если в качестве носителя изображения используют набор диапозитивов, их проецируют с помощью объектива на диффузно рассеивающий экран. На рис. 4.16 показана схема эксперимента, выполненного в лаборатории ЛЭИС [4.16]. С помощью фото-

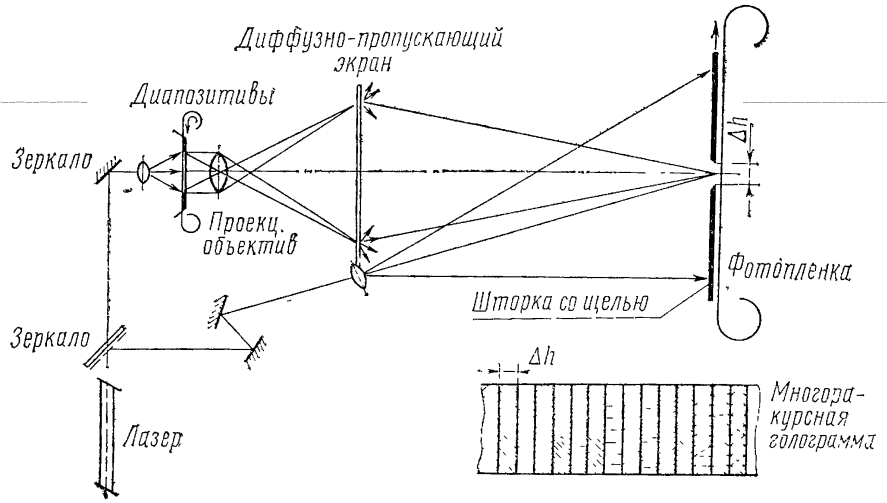


Рис. 4.16. Получение многоракурсной голограммы из последовательности диапозитивов

аппарата и обычной фотопленки производилась съемка объекта в некогерентном свете с 56 разных позиций, сдвинутых друг относительно друга на угловые интервалы $\Delta\psi = 15'$, полный угол бокового обзора объекта фотоаппаратом составил $\psi = 13°45'$. Объектом служили три предмета — настольная лампа, телефонный аппарат и авометр. После фотохимической обработки пленки полученный негатив непосредственно использовался для голографирования без обращения в позитив. Серия полученных диапозитивов последовательно освещалась когерентным светом и проецировалась на полупрозрачный диффузно рассеивающий экран типа «арказоль». Рассеянный экраном свет избирательно, в виде узкой вертикальной полосы шириной 5 мм записывался на пленку типа «Микрат-300». Для этой цели перед неподвижно закрепленной пленкой помещалась оптически непрозрачная шторка с вертикальной щелью шириной 5 мм, которая освещалась когерентным фоном и смещалась в горизонтальном направлении на ширину щели при каждой смене изображения.

На рис. 4 17 показана фотография части полученной по описанной схеме голограммы, состоящей из 56 полосок шириной 5 мм и результат воспроизведения изображений с нее. Фотоаппарат з

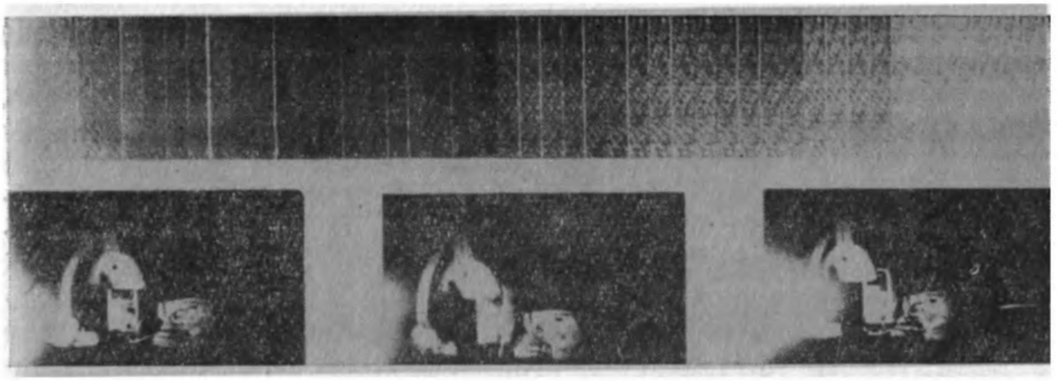


Рис 4.17. Многоракурсная голограмма совокупности плоских изображений и результаты восстановления объемного образа

печатлел слитные изображения трех ракурсов объемной сцены. Последнее подтверждается параллактическими смещениями планов при перемещении точки съемки вдоль голограммы.

Положительные результаты получены и в опытах с другими сюжетами (памятник Петру I на площади Декабристов в Ленинграде и голова девушки) и при других фотоматериалах («Микрат ВРЛ»).

Таким образом, рассмотренные способы формирования многоракурсных голограмм могут быть использованы в телевизионных системах с конечным числом ракурсов, а также в любых случаях записи на фоточувствительную поверхность ряда диапозитивов объемного объекта для получения ощущения глубины воспроизводимых изображений и возможности их оглядывания.

Голографический экран

Изобретатель голографии Д. Габор высказал предположение о возможности селекции ракурсов на основе использования отражательных свойств трехмерных голограмм, разработанных советским ученым Ю. Н. Денисюком [4.17]. При этом плоскость совмещения изображений и, собственно, сам селектор представляет одну и ту же светочувствительную поверхность с объемной эмульсией. На нее голографическими методами записывают две серии перемежающихся световых потоков (для левого и правого глаза), ограниченных с одной стороны экраном-голограммой, а с другой стороны — зонами избирательного видения. Эти зоны располагаются в плоскости преимущественного расположения глаз наблюдателя в зрительном зале (речь идет о голографической стереокинопроекции с одной многократно повторяемой стереопарой). Интересно, что здесь возможно осуществить любое, в том числе параллельное расположение зон, что особенно важно для обеспечения одинаковых условий наблюдения во всем зале (нормальный глазной базис практически одинаков у всех зрителей). Трехмерная голограмма является отражательной и избирательной по направлению и цвету. Поэтому при проекции в белом свете двух цвет-

ных изображений стереопары с помощью разнесенных проекторов можно наблюдать цветное объемное изображение (без эффекта оглядывания) из любого места зала, выбрав такое положение, при котором левый и правый глаза попадут в соответствующие им зоны. Габор указывает, что реализация этой идеи для большого киноэкрана, возможно, будет осуществлена в следующем столетии, так как возникающие трудности весьма значительны (мощность лазеров, длина когерентности и т. д.). Исследование этой проблемы ведется во Всесоюзном научно-исследовательском кинофотоинституте, его работы явятся логическим продолжением и развитием идей С. П. Иванова, Д. Габора, Ю. Н. Денисюка. Аналогичные исследования, безусловно, необходимо вести и применительно к телевидению.

Процесс изготовления трехмерного голографического экрана при горизонтальном расположении зон избирательного видения

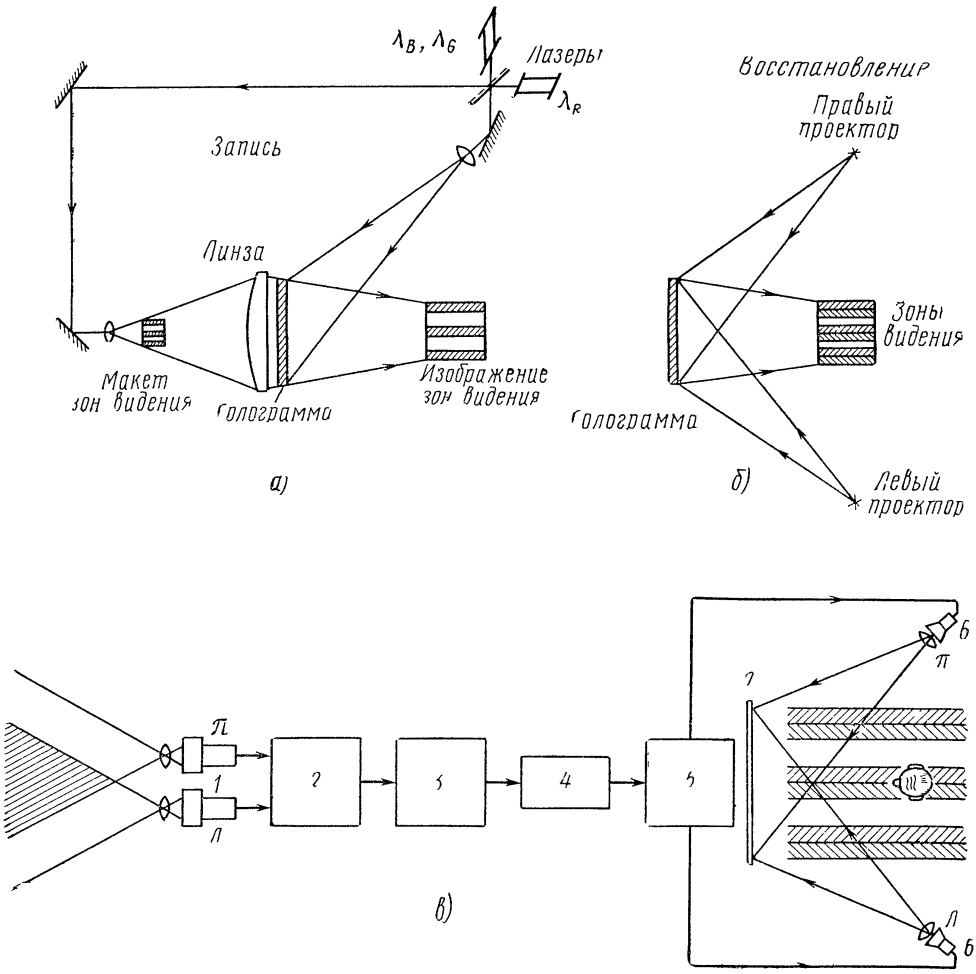


Рис. 4 18. Формирование трехмерного голографического экрана (*а*) и его использование в стереотелевизионной системе (*б*, *в*):

1 — передающие ТВ трубки; *2* — ТВ камера; *3* — передатчик; *4* — канал связи, *5* — приемник; *6* — лазерные кинескопы; *7* — голографический экран

показан на рис. 4.18. На голограмму последовательно записывают цветоделенные увеличенные изображения левых зон избирательного видения в свете лазеров трех длин волн со смещенным опорным источником, а потом правых зон с опорным источником, сдвинутым на угол, больший $\theta_{кр}$ [4.18]:

$$\theta_{кр} = \left(\frac{\lambda}{nd}\right)^{1/2}, \qquad (4.6)$$

где d — толщина фотографической эмульсии; n — показатель преломления эмульсии. В результате в голограмме образуется сложная структура из шести дифракционных решеток, на которые при воспроизведении проецируют цветные изображения стереопары. Проекционные системы разносят на тот же угол, что и опорные источники при записи, чтобы избежать дифракции света проектора на «чужой» дифракционной решетке.

При воспроизведении стереопары лучше использовать источники с ярко выраженными спектральными линиями. Трехмерные голограммы обладают избирательностью к направлению падающего света при определенной длине волны. Если освещать такую голограмму источником с широким спектром излучения, ее избирательность к направлению практически будет равно нулю, что приведет к появлению обширной зоны помех.

При использовании тонкослойных голограмм указанная методика селекции изображений на основе использования фокусирующих свойств голограммы может быть использована и в многоракурсных системах [4.19]. В этом случае на плоскую голограм-

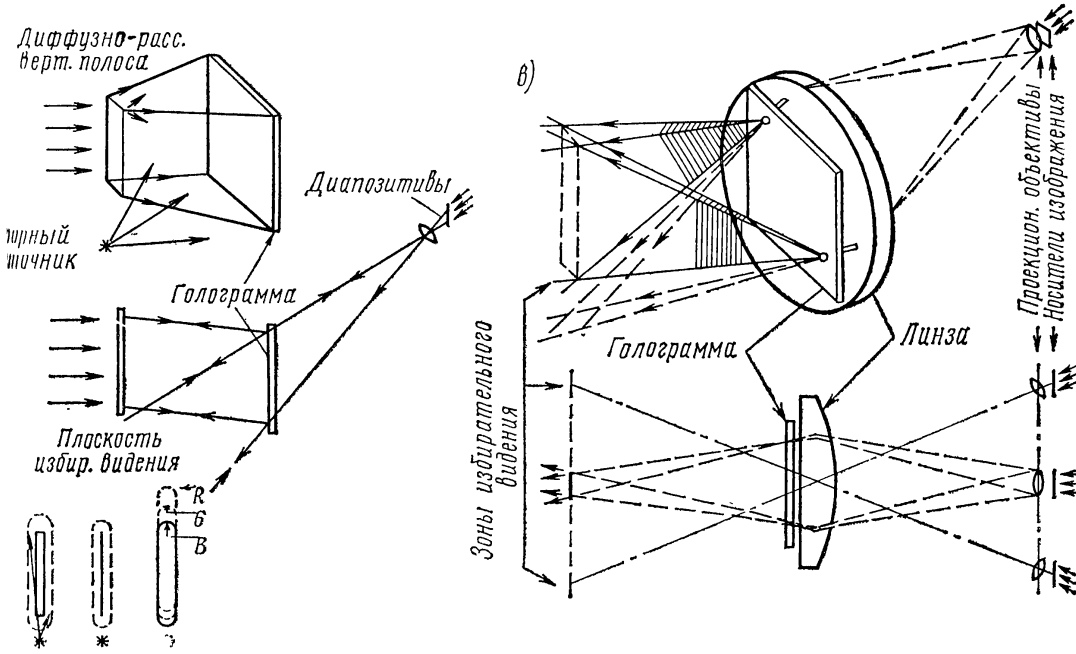


Рис. 4.19. Формирование голографического экрана (*а*, *б*) и использование его для сепарации изображений (*б*, *в*) в многоракурсных телевизионных системах

му записывают лишь один поток лучей, имеющий форму усеченной четырехугольной пирамиды, для этого в качестве объекта записи используют вертикальную диффузно рассеивающую полоску, ширина которой соответствует одной зоне избирательного видения. Когерентная подсветка может быть как в сходящемся, так и в расходящемся свете (рис. 4.19*а*, *б*). Если полученную после отбеливания тонкую фазовую голограмму освещают сопряженным волновым фронтом (рис. 4.19*в*), то восстанавливается исходная волна, только распространяющаяся в обратном направлении — от голограммы к зоне избирательного видения, из которой (и только из нее) можно видеть всю голограмму в виде равнояркой площадки. Если воспроизводящий когерентный пучок промодулировать каким либо изображением и сфокусировать его в плоскости голограммы, это изображение и будет видно из данной зоны. Непосредственно просвечивать диапозитив или другой носитель изображения в расходящемся или в сходящемся пучке без использования фокусирующего объектива нельзя, так как возникающая на структуре диапозитива дифракция света не позволяет получить четкое изображение.

Рисунок 4.19*б* иллюстрирует процесс воспроизведения для расходящегося пучка, а рис. 4.19*в* — для сходящегося, причем в последнем случае проекция осуществляется обычным способом в расходящемся пучке, а его преобразование в сходящийся осуществляется с помощью дополнительной линзы, установленной непосредственно перед голограммой и по размерам несколько превышающей ее апертуру. Если голограмму освещают с разных направлений несколько проекторов, то в плоскости избирательного видения будет столько же рядом расположенных зон.

Использование объективов приводит, однако, к тому, что каждая точка голограммы освещается сейчас лучами, имеющими разные, хотя и близкие направления (рис. 4.19*в*, пунктир). Это приводит к некоторому размытию зоны избирательного видения по высоте и ширине (рис. 4.19*г*). Изменение высоты зоны не играет никакой роли, в то время как расширение зоны необходимо учитывать, ибо оно может привести к появлению зоны помех. Если необходимо уменьшить ширину зоны, надо выбрать более узкую вертикальную полоску при записи голограммы, так что в пределе при штриховой линии, ширина зоны будет определяться лишь расходимостью лучей, сфокусированных объективом на плоскость голограммы.

Использование штриховой линии в качестве объекта записи при формировании голографического сепарирующего экрана является также интересным случаем с точки зрения воспроизведения не только одноцветных монохроматических, но также черно-белых и цветных изображений. Действительно, если на голограмму проецировать носитель изображения (экран светоклапанной системы, черно-белые или цветные диапозитивы, экран телевизионного проекционного кинескопа) в белом свете или в лучах трех лазеров R, G, B, то деформация зоны избирательного видения

будет происходить, как показано стрелками на рис. 4.19*г*, по линии эталонный луч — дифрагированный луч. Чем больше длина волны λ, тем на больший угол она отклонится при неизменных параметрах решетки. Синие лучи отклоняются меньше, зеленые — больше, красные — еще больше. Если голографический экран изготовляется в зеленом свете, то для него и воспроизведение будет нормальным, однако при красном свете зоны избирательного видения расширятся и, значит, будут перекрываться и создавать зоны помех, а для синего света, наоборот, сузятся, т. е. между зонами будут пустые промежутки («слепые» вертикальные участки). Если же ширина вертикальной полосы при записи стремится к нулю (штриховая линия), то полученная решетка дифрагирует лучи только в вертикальном направлении и перекрытий зон по ширине не будет. При этом, правда, еще остается их «расползание» по высоте, однако это менее принципиальный недостаток, так как в тех участках, где зоны совпадают (область средних высот на рис. 4.19*г*), можно наблюдать черно-белое или цветное (при использовании трех цветоделенных носителей изображения или цветных диапозитивов) изображение.

Другое решение вопроса сепарации цветных изображений, хотя и более трудоемкое технологически, заключается в получении составного голографического экрана, состоящего из узких чередующихся горизонтальных или вертикальных полосок трех дифракционных решеток, соответствующих основным цветам R, G и B и прикрытых соответствующими светофильтрами.

Проекцию проще осуществлять в расходящемся пучке (рис. 4.19*б*), однако анализ показывает, что в этом случае красная зона избирательного видения для некоторых участков голографического экрана (с большими углами дифракции) еще более рассовмещается с зеленой и синей и полезная площадь неискаженного наблюдения изображений в полихроматическом свете становится еще меньше. В областях выше и ниже этой разрешенной площади будут наблюдаться цветовые искажения, так как из трех необходимых цветоделенных изображений исчезнет сначала одно (красное внизу и синее вверху), а потом сразу два (красное и зеленое внизу, синее и зеленое вверху).

На рис. 4.20 показано влияние дифракции света на структуре голографического экрана на распределение световых потоков в зонах избирательного видения от четырех монохроматических источников (криптоновый, гелий-неоновый и аргоновый лазеры с длинами волн λ=0,65; 0,63; 0,51; 0,49 мкм). При записи диффузно рассеивающую вертикальную полоску располагают вплотную к источнику опорной волны, поэтому в нижней части зон рассовмещения цветоделенных световых потоков нет. Верхние границы зон будут неодинаковыми для различных длин волн, причем более длинноволновые (красные) волны дифрагируют на больший угол. Если голографический экран получен в синем свете (λ=0,49 мкм) и обеспечивает нормальное наблюдение изображений, сфокусированных на голографическом экране, при максималь-

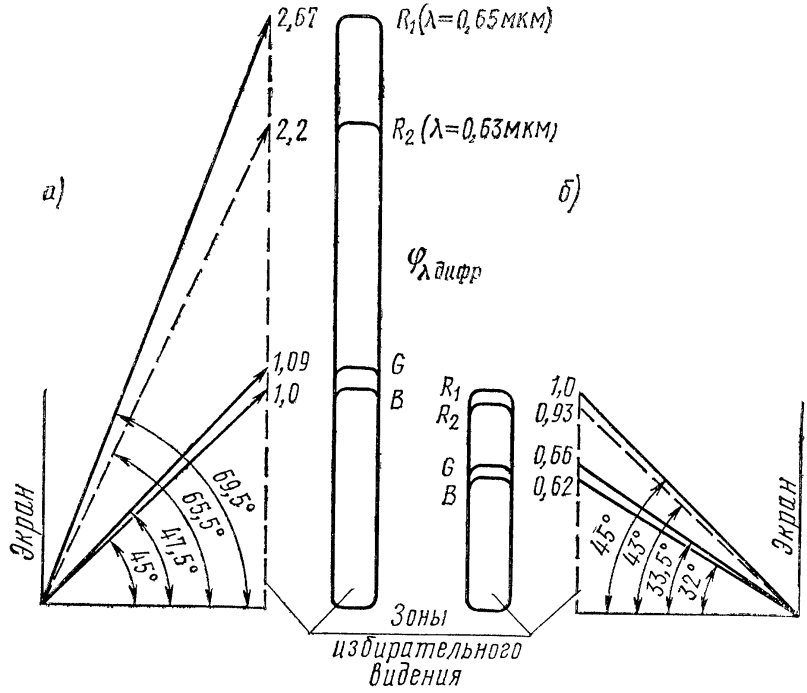


Рис. 4.20. Дифракция полихроматического света на голографическом экране; $\varphi_{\lambda_{дифр}}$ определяется ф-лой (4.7)

ном угле дифракции $\varphi=45°$, то в пределы этого же угла попадает основная часть дифрагированных лучей и от остальных источников (рис. 4.20*а*), в связи с чем в этой области можно видеть цветное изображение. Дифракция от более длинноволновых источников распространяется и за пределы этой совмещенной зоны ($\varphi_G=47{,}5°$, $\varphi_{R2}=65{,}5°$, $\varphi_{R1}=69{,}5°$), приводя к небольшому ослаблению используемой части светового потока. Эти потери всегда можно скомпенсировать соответствующим увеличением мощности воспроизводящих источников. На рис. 4.20*б* видно, что если бы запись той же щели осуществлялась в красном свете ($\lambda=0{,}65$ мкм), то полезно используемая область перекрытия цветоделенных потоков значительно уменьшилась бы ($\varphi_{R2}=43°$, $\varphi_G=33{,}5°$, $\varphi_B=32°$). Поэтому при формировании голографического экрана в красном свете высоту диффузно рассеивающей щели (объекта записи) надо выбирать такой, чтобы дифракция самого коротковолнового — синего света на голографическом экране обеспечивала требуемую зону избирательного видения. Приведенное ниже уравнение позволяет оценить величину максимального дифракционного угла $\varphi_{\lambda\,дифр}$ на заданной решетке, полученной при угле записи $\varphi_{зап}$ и длине волны записывающего источника $\lambda_{зап}$:

$$\varphi_{\lambda_{дифр}} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{\lambda_{зап}}\sin\varphi_{зап}\right). \qquad (4.7)$$

Принципиально возможно осуществить воспроизведение и в некогерентном, белом свете. Голографический экран для этого случая тоже может быть изготовлен при любом источнике когерент-

ного света, но с таким расчетом, чтобы зоны избирательного видения от самых коротковолновых составляющих видимого участка спектра ($\lambda = 0{,}4$ мкм) имели достаточную высоту, обеспечивающую нормальное рассматривание (сквозь эти зоны) изображений.

Интересно то обстоятельство, что голографический экран может представлять собой как голограмму вертикальной щели, так и ее автоголограмму, т. е. использовать опорный источник при записи необязательно. Действительно, в обоих случаях дифракционная решетка будет отклонять лучи воспроизводящего источника в вертикальном направлении, что и нужно для образования зон избирательного видения. Удвоение ширины зоны, которое получается при использовании автоголограммы щели, можно учесть при записи.

Предварительные эксперименты по изготовлению голографического экрана на фотопластинках типа «Микрат ВР» и «Mikrat LP-1» размером 9×12 см^2 подтверждают практическую возможность реализации подобной методики сепарации изображений, особенно при использовании автоголограмм. Недостатком автоголографического экрана является неравномерное рассеивание светового потока в пределах зоны избирательного видения (плотность потока максимальна в центре и уменьшается в сторону вертикальных и горизонтальных границ зоны примерно по нормальному закону). Кроме того, в центре зоны будет находиться и неотклоненный световой пучок (нулевой порядок дифракции) и яркость наблюдаемых изображений здесь еще более увеличится.

Аналогичного сепарирующего эффекта при отсутствии множительного свойства экрана можно достичь, если в месте фокусировки изображений поместить какую то другую рассеивающую среду с заданными параметрами. Такой средой может быть, например, параллельный горизонтальный оптический растр, индикатриса рассеяния которого достаточно узка в горизонтальном направлении и широко раскрыта в вертикальном направлении В последнем случае световой поток используется полностью и не происходит «расползания» по высоте зон избирательного видения при проекции полихроматических изображений.

Таким образом, использование тонкослойного голографического экрана для селекции изображений в многоракурсных телевизионных системах принципиально возможно. Недостатком такого экрана является неравномерное распределение светового потока в зонах избирательного видения и трудности мультипликации зон. Для получения нескольких зон видения изображения одного ракурса их расположение в вертикальной плоскости может быть, например, не параллельным, а веерообразным.

Большой интерес представляют исследования по созданию сепарирующего голографического экрана на основе использования объемных светочувствительных эмульсий. При этом число позиций наблюдения, очевидно, ограничится одной (одна многократно повторяемая стереопара), т. е. эффекта обзора изображений не будет Конечная цель таких работ — замена сложного линзово-растрового сепарирующего экрана голографическим.

Принцип действия селектора изображений, выполненного в виде просветного линзового экрана, заключается в формировании зон избирательного видения с помощью коллимирующей линзы [4.20] и последующим расширением этих зон в вертикальном направлении цилиндрическим линзовым растром (вместо тонкой автоголограммы зоны) [4.19, 4.34]. Функциональная схема воспроизводящего устройства многоракурсной телевизионной системы с использованием просветного линзового экрана представлена на рис. 4.21.

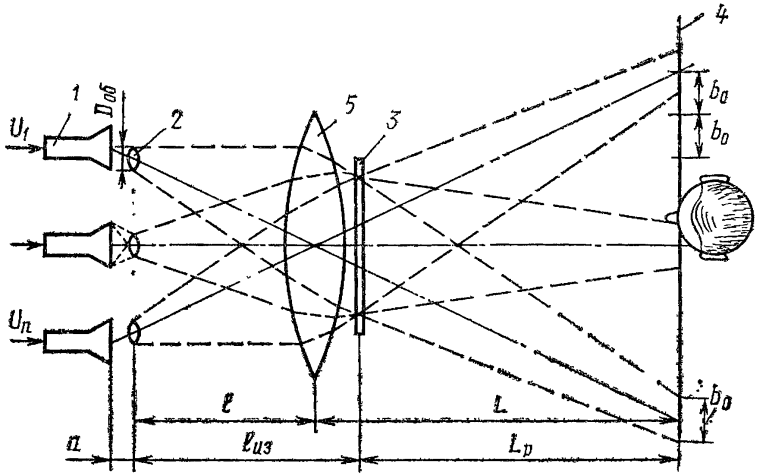


Рис. 4.21. Многоракурсное телевизионное воспроизводящее устройство с просветным линзовым экраном:
1 — проекционный кинескоп; *2* — проекционный объектив; *3* — оптический горизонтальный растр; *4* — плоскость наблюдения: *5* — коллимирующая линза

Изображения наблюдаемого объекта, фиксируемые передающими камерами с различных ракурсов, передаются по каналам связи и воспроизводятся на экранах проекционных кинескопов *1*. Проекционные объективы *2* проецируют изображения в плоскость горизонтального оптического растра *3*, представляющего собой систему горизонтально расположенных вплотную друг к другу цилиндрических линзочек. Расстояния между соседними проекционными объективами и от экрана до плоскости наблюдения *4* подобраны таким образом, что расстояние между двумя соседними зонами избирательного видения в плоскости наблюдения и их ширина равны величине среднего глазного базиса $b_0 = 65$ мм.

Назначение коллимирующей линзы *5* состоит в том, чтобы спроектировать расположенные рядом друг с другом выходные зрачки проекционных объективов в плоскость наблюдения, увеличив их до величины 65 мм, сформировав тем самым зоны избирательного видения. Как видно из рисунка, в процессе создания в плоскости наблюдения зон избирательного видения коллимирующая линза выполняет основные функции. Назначение оптического горизонтального растра, установленного между коллимирую-

щей линзой и плоскостью наблюдения, состоит в формировании вертикальных размеров зон избирательного видения. Это происходит благодаря свойствам оптического растра пропускать световые лучи в горизонтальной плоскости и рассеивать их в вертикальной плоскости, но лишь в пределах определенного угла, величина которого обусловлена параметрами растра.

Исходными данными для расчета параметров коллимирующей линзы являются параметры проекционных объективов и геометрические размеры оптического растра, влияющие на расстояние от линзы до плоскости наблюдения L. В экспериментальной установке был использован оптический растр размером 300×400 мм, следовательно, оптимальное расстояние плоскости наблюдения от растрового экрана

$$L_p \approx L \approx 5\,h_э = 5 \cdot 300 = 1500 \text{ мм},$$

где $h_э$ — высота растрового экрана, на котором фокусируются изображения

Линейное увеличение, обеспечиваемое коллимирующей линзой, должно быть таким, чтобы действительное изображение выходного зрачка проекционного объектива, находящееся в плоскости наблюдения, имело диаметр 65 мм, т. е. равный ширине зоны и среднему глазному базису b_0. В качестве проекционного объектива был использован объектив типа «Юпитер-3» с фокусным расстоянием 52,54 мм и диаметром зрачка $D_{об}=35$ мм. Построив ход лучей от проекционных объективов (рис. 4.21), найдем расстояние $l_{из}$ от объективов до плоскости фокусировки изображения (до растра)

$$l_{из} = l \approx \frac{D_{об} L}{b_0} = \frac{35 \cdot 1500}{65} = 808 \text{ мм}, \qquad (4.8)$$

где l — расстояние от объективов до линзы.

Основное соотношение, определяющее оптическую силу коллимирующей линзы,

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{L} = \frac{1}{f}, \qquad (4.9)$$

где f — фокусное расстояние коллимирующей линзы. Приняв во внимание определенные выше величины $L=1500$ мм и $l=808$ мм, получим $f=525$ мм.

Для определения геометрических размеров линзы воспользуемся соотношением

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1}\right)(n-1) = \frac{1}{f}, \qquad (4.10)$$

где R_1, R_2 — радиусы кривизны поверхностей линзы; n — показатель преломления стекла.

Приняв $f=525$ мм, $n=1{,}52$ (для стекла типа К8) и $R_1=R_2$, получим $R_1=R_2=54{,}6$ см. Очевидно, что такая линза имеет большие габариты и вес, поэтому целесообразно использование секционированной линзы Френеля, имеющей постоянную толщину и оптические свойства, не отличающиеся от обычной линзы.

На рис. 4.22 показан внешний вид линз, которые в принципе могут быть использованы для формирования зон избирательного видения в многоракурсной телевизионной системе: рис. 4.22*а* — обычная стеклянная линза, рис. 4.22*б* — секционированные линзы Френеля японского производства. При выборе линзы того или иного типа следует иметь в виду, что сферические и хроматические аберрации коллимирующей линзы представляют собой один из основных факторов, ограничивающих число ракурсов в многоракурсной телевизионной системе с коллимирующей линзой. Коррекцию этих аберраций будет, очевидно, проще осуществить для обычной линзы, так как технология производства линз Френеля сложна и еще недостаточно отработана. С другой стороны, линза Френеля более удобна в эксплуатации, так как вес и габариты ее незначительны.

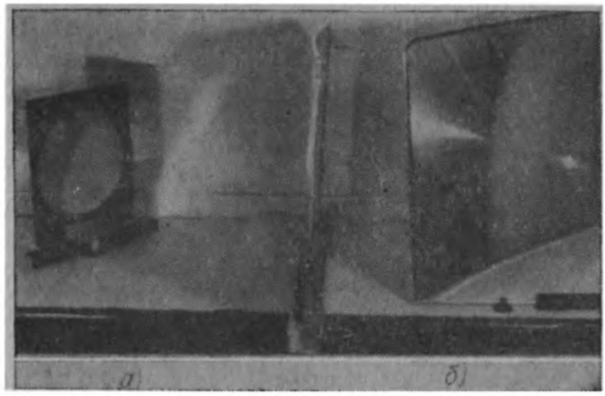


Рис. 4.22. Внешний вид обычной оптической линзы (*а*) и линзы Френеля (*б*)

В качестве избирательно рассеивающей среды может быть использован любой экран, обладающий следующими свойствами:

1. Размер элементов экрана должен быть существенно меньше элементов телевизионного изображения.

2. Экран должен рассеивать световые лучи только в вертикальной плоскости во избежание перекрестных искажений при наблюдении многоракурсного изображения.

3. Угол рассеивания световых лучей в вертикальной плоскости должен быть ограничен с целью оптимального использования светового потока и увеличения визуальной яркости наблюдаемого изображения.

4. Световой поток в пределах зоны должен распределяться равномерно.

При использовании для этой цели автоголограммы первые три условия выполняются, однако яркость наблюдаемых изображений в пределах зоны будет изменяться. Применение оптического растра, представляющего собой совокупность цилиндрических горизонтальных линзочек, расположенных в вертикальной плоскости с достаточно малым шагом, позволяет выполнить все четыре указанные выше требования.

Рассмотрим подробно процесс образования зон избирательного видения с помощью растрового экрана. Равномерное рассеивание световых лучей в вертикальной плоскости в пределах угла φ (рис. 4.23) происходит благодаря действию цилиндрических линзочек, составляющих поверхность оптического растра *1*. Требуемая индикатриса рассеяния растрового экрана в вертикальной плоскости

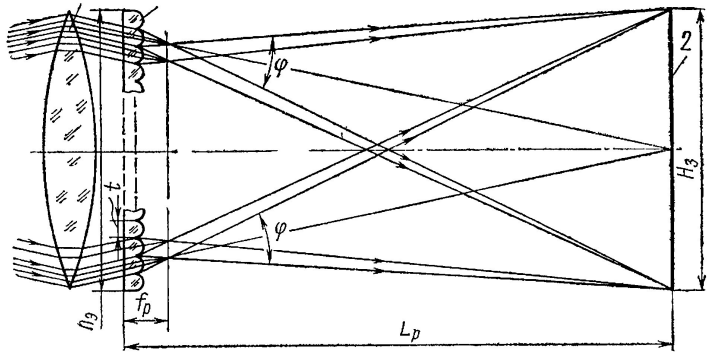


Рис. 4.23 Образование зоны избирательного видения оптическим растром и коллимирующей линзой:

1 — оптический растр; *2* — зона избирательного видения; *3* — коллимирующая линза

достигается при определенных параметрах растра. В соответствии с оптическими свойствами каждой линзы растра справедливо соотношение

$$\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}=\frac{t}{2f_{\text{р}}}=\frac{H_{\text{з}}}{2L_{\text{р}}}, \tag{4.11}$$

где t — шаг линзочек оптического растра; $f_{\text{р}}$ — фокусное расстояние растра; $H_{\text{з}}$ — высота зоны 2.

Отсюда видно, что относительное отверстие элементов растра $\ddot{O}_{\text{р}}=t/f_{\text{р}}$ для получения заданной высоты зоны $H_{\text{з}}$ при известном расстоянии наблюдения $L_{\text{р}}$ должно быть равно

$$\ddot{O}_{\text{р}}=\frac{H_{\text{з}}}{L_{\text{р}}}. \tag{4.12}$$

При $L_{\text{р}}=1{,}5$ м и $H_{\text{з}}=1$ м $\ddot{O}_{\text{р}}=1:1{,}5$.

Рассматривая процесс образования зон избирательного видения (см. рис. 4.21), нетрудно выделить две самостоятельные оптические системы. Это проекционный объектив, проецирующий изображение с экрана кинескопа в плоскость оптического растра, и коллимирующая линза, проецирующая изображение выходного зрачка объектива в плоскость наблюдения. При этом обе системы существуют самостоятельно и к расстоянию от коллимирующей линзы до оптического растра не предъявляется особых требований.

Для проекции изображений различных ракурсов на просветный линзовый экран могут быть использованы проекционные кинескопы. В этом случае яркость изображения, спроектированного на диффузно-рассеивающий экран, помещенный вместо растра, определится выражением

$$B'_{\text{э}}=\frac{B_{\text{э}}\tau\tau'\ddot{O}^2}{4(1+\beta)^2}, \tag{4.13}$$

где $B_{\text{э}}$ — яркость экрана кинескопа; τ — коэффициент прозрачности объектива; τ' — коэффициент прозрачности линзового растра; $\ddot{O}$ — относительное отверстие объектива; β — линейное увеличение изображения.

Для определения величины линейного увеличения рассмотрим основное соотношение для проекционного объектива (см. рис. 4.21)

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{l_{\text{из}}}=\frac{1}{f_{\text{об}}},$$

где a — расстояние от экрана кинескопа до главной плоскости проекционного объектива; $l_{\text{из}}$ — расстояние от главной плоскости объектива до растрового экрана; $f_{\text{об}}$ — фокусное расстояние проекционного объектива. При $f_{\text{об}}=52{,}54$ мм и $l_{\text{из}}=808$ мм (эта величина может меняться в зависимости от параметров коллимирующей линзы) $a=56{,}2$ мм. Тогда линейное увеличение

$$\beta=\frac{l_{\text{из}}}{a}=\frac{808}{56{,}2}\approx 14{,}4.$$

Для определения визуальной яркости изображения $B_{\text{виз}}$, наблюдаемого из каждой зоны, необходимо учесть перераспределение светового потока оптическим растром. Ввиду того, что растр рассеивает свет только по вертикали, в ограниченную по площади зону $S_{\text{з}}$, которая стягивает на растре телесный угол

$$\alpha_{\text{з}}=\frac{S_{\text{з}}}{L_{\text{р}}^2}=\frac{b_0 H_{\text{з}}}{L_{\text{р}}^2}, \tag{4.14}$$

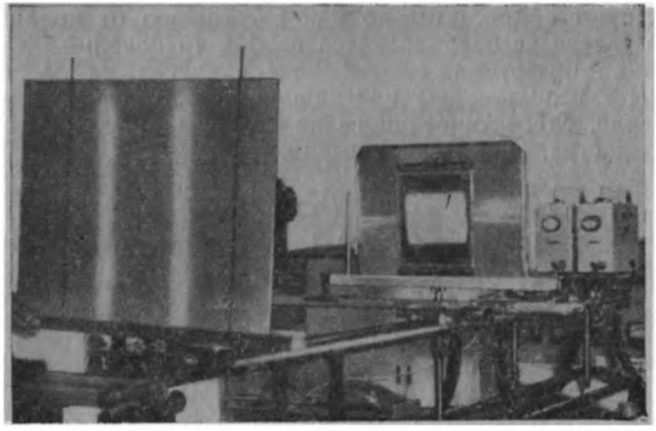
и, с учетом закона Ламберта, визуальная яркость наблюдаемого изображения

$$B_{\text{виз}}=\frac{2\pi}{2\alpha_{\text{з}}}B'_{\text{э}}=\frac{\pi}{\alpha_{\text{з}}}\frac{\tau\tau'\ddot{O}^2}{4(1+\beta)^2}B_{\text{э}}\approx$$
$$\approx\frac{\pi\tau\tau'(2R_{\text{об}})^2\pi}{\alpha_{\text{з}}4\beta^2 f_{\text{об}}^2\pi}B_{\text{э}}\approx\frac{\alpha_{\text{об}}\tau\tau'}{\alpha_{\text{з}}\beta^2}B_{\text{э}}. \tag{4.15}$$

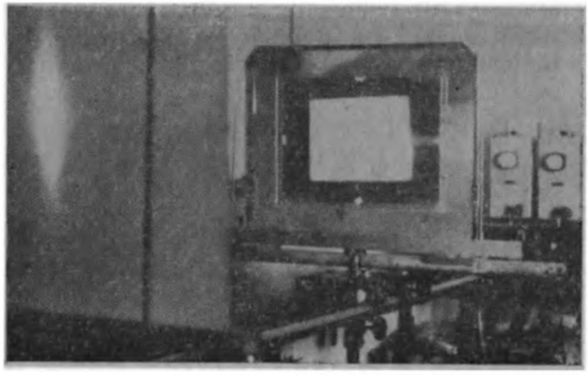
Полученное выражение имеет явно выраженный физический смысл. Отношение телесных углов $\alpha_{об} : \alpha_з$, где $\alpha_{об} = S_{об}/a^2 \approx \pi R_{об}^2 / f_{об}^2$ пропорционально увеличению плотности светового потока в зоне наблюдения, т. е. увеличению яркости. Линейное увеличение изображения (коэффициент β) и световые потери в объективе и линзовом экране (коэффициенты τ и τ') визуальную яркость снижают. При $B_э = 4000$ кд/м², $\beta = 14{,}4$, $\tau = \tau' = 0{,}8$, $b_0 = 6{,}5$ см, $H_з = 1$ м, $L_р = 1{,}5$ и $O_2 = 1 \div 1{,}5$ визуальная яркость

$$B_{виз} = \frac{\pi \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8\,(1:1{,}5)^2 \cdot 4000}{\dfrac{0{,}065 \cdot 1}{1{,}5^2} \cdot 4\,(1 + 14{,}4)^2} = 130 \text{ кд/м}^2.$$

Полученная величина является вполне достаточной и позволяет использовать мультипликацию зон избирательного видения, которая снижает яркость наблюдаемого изображения, но зато позволяет увеличить число зрителей. При трех зонах визуальная яркость в каждой из них будет около 43 кд/м². Визуальную яркость изображений можно увеличить за счет сокращения высоты зоны. Например, при $H_з = 0{,}33$ м (вместо 1 м) яркость увеличивается в три раза и



а



б

Рис. 4.24. Внешний вид экспериментальной установки с просветным линзовым экраном при использовании в качестве рассеивающей среды оптического растра (*а*) и автоголограммы (*б*)

составит 130 кд/м². Таким образом, обычные проекционные кинескопы типа 6ЛК2А (цвет сечения синий), 6ЛК2И (зеленый), 6ЛК2П (красный), 6ЛК1Б (белый) с яркостью экрана 1000—4000 кд/м² пригодны для использования в многоракурсной цветной телевизионной системе. Перспективен в этом отношении лазерный кинескоп, который может обеспечить значительную яркость при небольших размерах совмещенного экрана.

На рис. 4.24 приведены фотографии экспериментальной установки с просветным линзовым экраном (в центре) и использовании в качестве рассеивающей среды оптического растра (рис. 4.24*а*) и автоголограммы (рис. 4.24*б*). Включены 9 оптических проектора, работающих без диапозитивов. На переднем плане видны две сформированные в плоскости наблюдения зоны избирательного видения.

Селектор типа «бегущая щель»

Рассмотрим еще один способ пространственной селекции ракурсов в многоракурсных телевизионных системах. Необходимую форму расходящейся от воспроизводимых изображений световой волны можно получить, если в плоскости избирательного видения поместить селектор типа «бегущая щель» [4.21], который можно строить на основе известных экликсных (обтюраторных) или

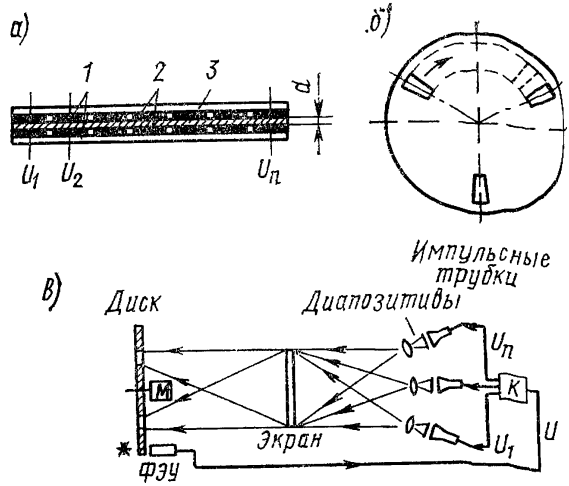
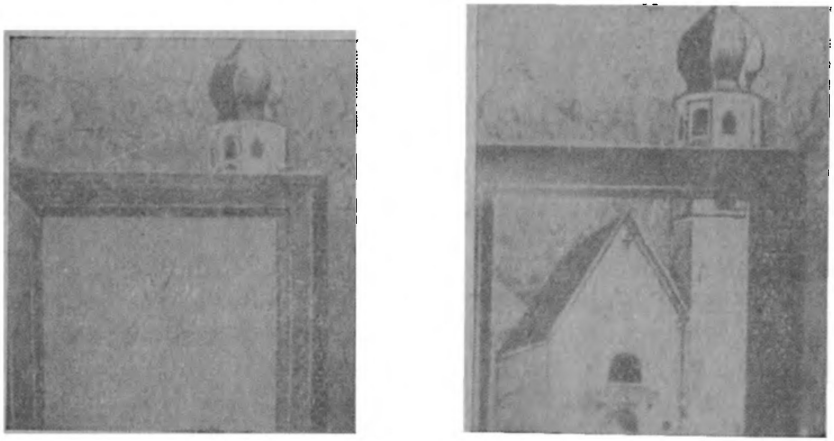


Рис. 4.25. Селектор типа «бегущая щель»

поляризационных методов разделения левого и правого изображений в стереоскопических системах. В этом случае зритель наблюдает изображение через вертикальную щель неподвижного селектора, скачкообразно (или плавно) перемещаемую в горизонтальном направлении при смене изображений. В качестве основы для разработки электронного варианта бегущей щели (рис. 4.25*а*) можно использовать, например, оптоэлектрический эффект динамического рассеяния в жидких кристаллах [4.22, 4.23]. Если между параллельными стеклянными пластинами *1*, покрытыми изнутри тонким прозрачным слоем окиси олова *2*, поместить слой

жидкокристаллической смеси *3* определенного состава, то получится устройство, оптические свойства которого изменяются в зависимости от величины приложенного к металлическим обкладкам напряжения U.

Если $U=0$, то жидкость прозрачна, т. е. полностью пропускает падающий на нее свет, почти не рассеивая его (рис. 4.26*а*). Состояние жидкости меняется, она становится турбулентной и



а) *б*)

Рис 4.26 Работа ячейки жидкого кристалла в режиме пропускания

начинает рассеивать свет в направлении распространения исходной волны (рис. 4.26*б*), если к металлическим пластинам приложить определенной величины постоянное или низкочастотное (несколько десятков герц) напряжение так, чтобы напряженность поля $E=U/d$ составляла около 5000 В/см. Например, для $d=12$ мкм жидкий кристалл (ЖК) станет непрозрачным при $U=60$ В. Для получения столь тонкого слоя активной зоны применяют распорки из таких полимеров, как, например, тефлон.

Один из электродов ЖК ячейки может быть и отражательным. На рис. 4.27 показано устройство ЖК ячейки отражательного типа (рис. 4.27*а*) и ее работа в режиме динамического рассеяния (рис. 4.27*б*). Центры рассеяния или области с изменяющимися коэффициентами преломления образуются в результате ориентирования длинных осей плоских стержнеобразных молекул ЖК в направлении движения появившихся в присутствии электрического поля ионов, в то время как в других точках объема кристалла, где ионов нет, в направлении поля ориентированы не оси молекул, а их дипольные моменты.

Если металлические обкладки внутри пластин разделить на ряд вертикальных полос n и коммутировать подаваемые на них напряжения U_1, U_2, ..., U_n [4.35], то можно обеспечить перемещение «электронной щели» в горизонтальном направлении синхронно и синфазно со сменой изображений на экране кинескопа (или диффузно рассеивающем экране в случае проекционной системы),

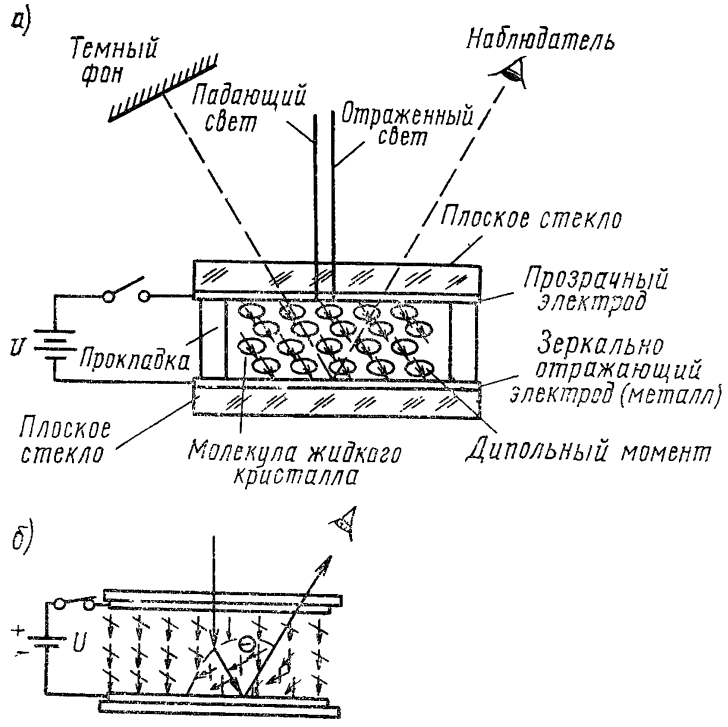


Рис 4.27 Устройство ячейки жидкого кристалла отражательного типа (*а*) и ее работа в режиме динамического рассеяния (*б*)

Инерционность описанного устройства пока относительно высока. Время перехода от прозрачного состояния к непрозрачному составляет от 1 до 5 мс, в зависимости от плотности тока в кристалле. Хуже обстоит дело с естественным временем затухания, необходимым для перевода кристалла в исходное состояние: оно составляет от 30 мс до 1 с. Затухание может стать серьезной проблемой в быстродействующих электронных схемах; для его уменьшения нужно вводить стирающий сигнал с частотой 1 кГц.

Возможно построение стереотелевизионной системы, использующей ЖК для индивидуального разделения [4.24]. В такой системе каждый наблюдатель снабжен ЖК очками, подключенными к распределительному блоку. Коммутация таких электронных шторок-очков должна осуществляться с частотой 100 Гц, чтобы обеспечить частоту предъявления каждого изображения стереопары равной 50 Гц.

В настоящее время может быть реализован механический вариант такого селектора, если, например, использовать вращающийся диск, в котором вырезана одна или несколько радиальных щелей (см. рис. 4.25*б*) и вращение которого происходит синфазно со сменой последовательно воспроизводимых на приемном экране изображений [4.2]. Этот метод селекции ракурсов был экспериментально проверен в статическом режиме, когда вместо телевизионных проекционных кинескопов использовались импульсные

трубки подсветки, перед которыми устанавливались неподвижные диапозитивы (см. рис. 4.25*в*). Малогабаритные импульсные трубки диаметром 4 см были специально разработаны в вакуумной лаборатории кафедры под руководством доцента Н. С. Веревкина и имели яркость свечения $B=300$ кд/м^2, напряжение на аноде $E_a=10$ кВ, напряжение запирания на модуляторе $E_{м.зап}=-90$ В. Изображения со всех диапозитивов проецировались на диффузно рассеивающий экран размером $0{,}24\times0{,}16$ м^2, в качестве которого использовалась пленка «арказоль». На расстоянии 0,6 м перед экраном на оси мотора M был установлен металлический диск диаметром 70 см с шестью щелями типа равнобочной трапеции. Диск вращался со скоростью 25 : 3 оборотов в секунду, что при шести щелях обеспечивало частоту повторения каждого изображения 50 Гц.

«Окно», синтезируемое каждой щелью, через которое можно было вести наблюдение пространственных изображений (рис. 4.28*а*), имело высоту $a=10$ см при средней ширине (по дуге) $b=35{,}5$ см. Ширину щели можно было выбрать

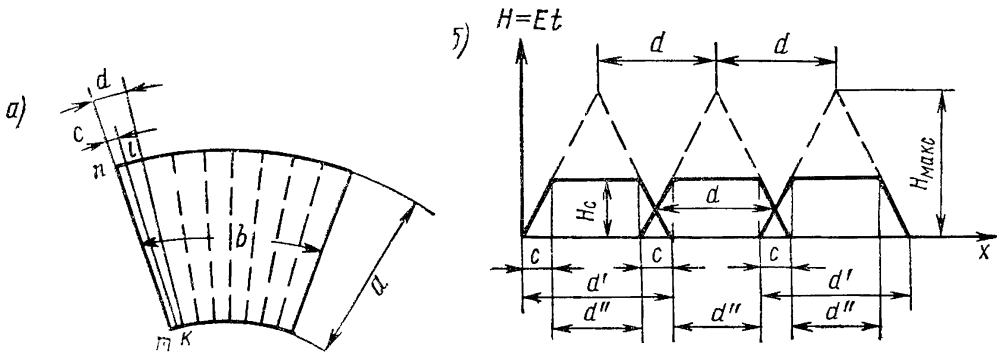


Рис. 4.28. Синтезированное «окно» механического селектора изображений (*а*) и распределение яркости в зонах избирательного видения (*б*)

равной периоду повторения зон избирательного видения d при очень кратковременной высветке каждого частичного изображения только в те моменты времени, когда щель переместится по окружности на свою ширину. Другой вариант — малая ширина щели c при длительности высветки, соответствующей периоду повторения зон избирательного видения d.

Уменьшение времени высветки в первом случае или ширины щели во втором приводит к уменьшению зоны помех между смежными ракурсами за счет уменьшения видимой наблюдателем яркости изображений (рис 4.28*б*). Ширина щели c практически и определяет зону помех, из которой одновременно будут видны оба изображения. Можно заметить, что период повторения зон избирательного видения d больше ширины этих зон d'' на ширину щели c и на такое же значение меньше полной зоны наблюдения одного изображения d':

$$d=d''+c=d'-c. \qquad (4.16)$$

Распределение яркости в зонах в общем случае имеет вид равнобочной трапеции. Линейное нарастание и спадание яркости на краях зон объясняется законом изменения экспозиции H, равной произведению освещенности экрана E на время наблюдения t_c. Время наблюдения зависит от ширины щели c, так как определенный участок зоны «просветляется» только с момента подхода к нему одного, переднего края щели kl и становится непрозрачным, как только до этого участка дойдет другая, тыльная сторона щели mn. Другими словами, вре-

мя наблюдения в центральной части каждой зоны, т. е. в зонах избирательного видения d'', равно времени перемещения щели на свою ширину. Этому времени соответствует определенная экспозиция $H_c = Et_c$. Увеличение ширины щели c и соответственно времени t_c приводит к увеличению времени экспозиции H_c, максимальная величина которой достигается, когда ширина щели будет равна половине той зоны, из которой должно просматриваться одно частичное изображение панорамограммы $c = d' : 2$. Дальнейшее увеличение ширины щели c не приводит к увеличению экспозиции и соответственно яркости наблюдаемых изображений, так как время экспозиции перестает увеличиваться и начинает линейно уменьшаться. Оно уже не соответствует ширине щели, а определяется временем, за которое передний край щели kl дойдет до границы зоны d'. Отсюда видно, что закон изменения яркости в зонах при $c = d' : 2$ — треугольный, как и при растровой сепарации изображений [4.4]. Таким образом, распределение наблюдаемой яркости изображений внутри зон в этом случае наиболее неравномерное, однако использование светового потока самое полное. Максимально возможная экспозиция, как легко заметить, при использовании селектора типа бегущая щель уменьшается, по сравнению с непрерывным наблюдением, в $2N$ раз:

$$H_{\text{макс}} = \frac{H_{\text{непр}}}{2N}. \qquad (4.17)$$

В эксперименте был выбран оптимальный по использованию светового потока вариант с шириной щели $c = d' : 2$, а зоны помех практически были сведены до нуля путем соответствующего укорачивания высвечивающих импульсов.

Синхронизация вращения диска с проекцией изображений осуществлялась посредством расположенных на периферии диска специальных отверстий, которые при вращении диска проходили между источником света и фотоэлектронным умножителем типа ФЭУ-20. Сигналы ФЭУ управляли работой коммутатора, который включал импульсные трубки поочередно.

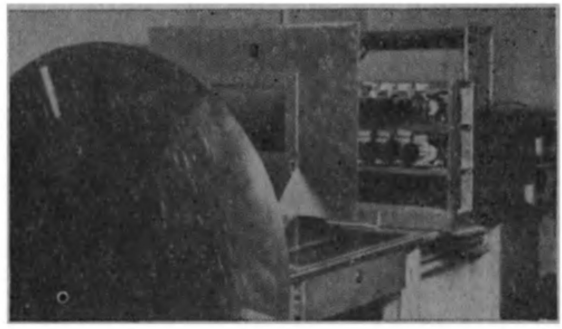


Рис. 4.29. Общий вид многоракурсной установки с механическим селектором изображений

В плоскости механического селектора (диска) при его вращении образуются зоны избирательного видения изображений отдельных ракурсов. В пространстве перед диском зритель каждым глазом воспринимает изображения, которые соответствуют различным ракурсам, за счет чего наблюдается стереоэффект. При изменении позиции зритель попадает в зоны избирательного видения, соответствующие другим ракурсам, за счет чего осуществляется эффект бокового обзора.

Оптическая модель позволяла воспроизводить до 16 изображений различных ракурсов объекта. Качество получаемых многоракурсных изображений было высокое. Общий вид многоракурсной установки с механической селекцией изображений показан на рис. 4.29.

Экспериментальная проверка данного способа селекции изображений различных ракурсов показала полную возможность использования этого способа в многоракурсных телевизионных системах при условии успешной разработки электронного варианта

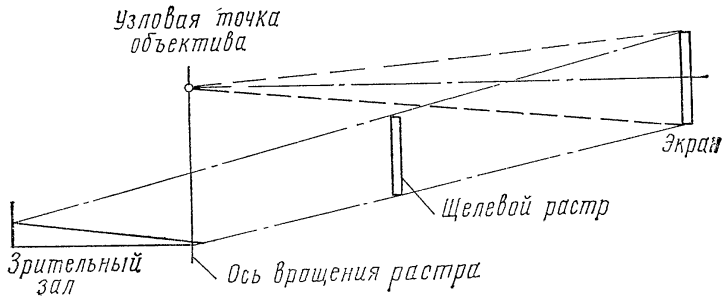


Рис 4 30. Принципы сепарации киноизображений с помощью обтюрационных методов

бегущей щели. В кинематографе были попытки использовать и механический селектор [4.21] — вертикальную щель многократно повторяли на бесконечной ленте, которую протягивали в пространстве между зрителями и экраном (рис. 4.30).

Другие методы селекции изображений

Многоракурсные системы требуют, несомненно, значительного усложнения передающего и особенно приемного оборудования, а также увеличения полосы передаваемых частот. В то же время зритель будет «осваивать» лишь небольшую часть из той большой информации, которая должна воспроизводиться на многоракурсном приемном устройстве вещательного типа. В самом деле, позиции наблюдения телевизионных изображений обычно статичны, а оглядывание изображений с разных сторон будет, очевидно, эпизодичным.

С учетом этой, в определенной мере справедливой, критики были предложены некоторые методы получения многоракурсного изображения для индивидуального наблюдения [4.25]. В таких системах отказываются от идеи одновременной передачи и воспроизведения всех ракурсов, так как наблюдатель в каждый момент времени может рассматривать только два изображения. Только смещаясь в сторону, наблюдатель начинает рассматривать новую пару изображений, соответствующих другой точке зрения. Таким образом, оказывается достаточным передавать и воспроизводить только одну стереопару, соответствующую положению наблюдателя.

Структурная схема многоракурсной телевизионной системы для этого случая приведена на рис. 4.31. Многоракурсная телевизионная камера *1* является датчиком сигналов изображений объекта, отличающихся между собой горизонтальным параллаксом. Эти сигналы поступают на коммутатор *2*, который осуществ-

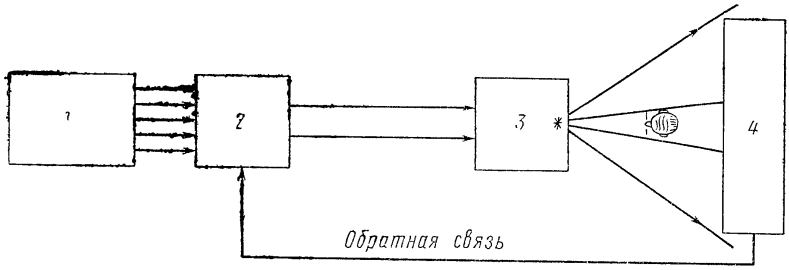


Рис. 4.31. Получение многоракурсного изображения для индивидуального наблюдения:
1 — многоракурсная ТВ камера; *2* — коммутатор; *3* — стереовидеоконтрольное устройство, *4* — датчик положения наблюдателя

ляет выбор лишь двух сигналов, соответствующих положению наблюдателя. Таким образом, полоса пропускания канала связи в общем случае лишь удваивается, как и в обычной стереотелевизионной системе, а воспроизводящее устройство может быть обычным стереовидеоконтрольным устройством *3* с очковым разделением изображений стереопары. Это является достоинством этой системы, так как позволяет обеспечить высокое качество воспроизведения изображений. Датчик положения наблюдателя *4*, управляющий через канал обратной связи коммутатором, может выполняться с помощью источника инфракрасной подсветки и блока фотодиодов, регистрирующих положение головы наблюдателя.

Недостатком системы является ограниченное число наблюдателей, так как для каждого из них требуется отдельный коммутатор, датчик положения наблюдателя и линия обратной связи. Если вместо статической многоракурсной камеры и коммутатора использовать подвижную стереотелевизионную камеру с блоком управления положением камеры, то такая система вообще будет предназначена только для одного наблюдателя. Многоракурсные телевизионные системы для индивидуального наблюдения предназначены, в основном, для прикладных целей.

В замкнутых телевизионных системах коммутатор стереопар может находиться и на приемной стороне у абонента и непосредственно управляться им с помощью переключателя. Возможность подведения многоракурсной видеоинформации к абоненту дает кабельное телевидение [4.26]. Для этой цели можно использовать свободный интервал частот 100—174 МГц между 5 и 6-м телевизионными каналами, разместив там около 10 изображений различных ракурсов. На приемной стороне здесь также используется обычное стереоцветное телевизионное устройство. Зрителю одновременно предъявляется только одна стереопара, но переключатель дает ему право выбора нескольких позиций наблюдения. Не исключена возможность использования этого варианта, как наиболее простого, в телевизионном вещании.

4.3. Многоракурсные системы и стереотелевидение

В лабораториях руководимой проф. П. В. Шмаковым кафедры телевидения ЛЭИС за последние годы выполнены большие и полезные исследования возможных путей построения многоракурсных телевизионных систем Исследованы такие вопросы, как использование для селекции ракурсов линзовых экранов, многоракурсных голограмм и голографических экранов, бегущей щели механической (вращающийся диск) и электрической (управляемые ячейки на жидком кристалле). Многоракурсные системы можно рассматривать как промежуточный этап между обычными стереоскопическими системами и голографическими телевизионными системами будущего на непрерывном пути повышения качественных показателей телевизионных изображений.

Практические разработки многоракурсных телевизионных систем — дело будущего. Сейчас речь может идти о разработке и внедрении в вещание стереоцветного телевидения. Однако нельзя отрицать взаимной связи этих двух проблем и наличия положительной обратной связи: технические решения, найденные для многоракурсных телевизионных систем, могут быть использованы при практической разработке стереоскопических систем и наоборот. Какие же решения проблемы вещательного стереоцветного телевидения представляются в настоящее время наиболее вероятными?

Фундаментальные исследования в области объемного и стереоцветного телевидения были проведены на кафедре телевидения ЛЭИС под руководством проф. П. В. Шмакова. Была показана возможность воспроизведения одного кадра стереопары в черно-белом виде, а другого — в красках; предложен способ передачи стереопары в полосе частот стандартного телевизионного канала; разработаны и испытаны экспериментальные макеты воспроизведения черно-белого и цветного объемного изображения, основанные на использовании двух кинескопов, полупрозрачного зеркала для совмещения изображений и поляроидных фильтров и очков для их разделения; показана принципиальная возможность получения на обычном цветном кинескопе черно-белого стереоскопического изображения путем воспроизведения изображений стереопары в дополнительных цветах и использования в качестве очков цветных анаглифов и др. [4.11]. Однако все эти методы пока еще не нашли практической реализации в телевизионном вещании. Основные причины — сложность приемного устройства (по существу, удвоение аппаратуры) или снижение качества воспроизводимых изображений. В настоящее время применение может найти, очевидно, лишь такой вариант, который не будет затрагивать существующие методы передачи черно-белых и цветных телевизионных программ и не потребует переделки абонентского приемника.

Таким образом, стереопара должна быть передана в полосе частот стандартного телевизионного канала (6,5 МГц). Кроме

того, для передачи информации нельзя использовать частотное уплотнение, так как в Советском Союзе принята система цветного телевидения СЕКАМ с частотной модуляцией цветовой поднесущей. Значит, возможно только временное уплотнение, т. е. поочередная передача сигналов двух кадров стереопары. При этом неизбежно произойдет определенная потеря четкости.

Коммутацию по строкам применять нельзя, так как в системе СЕКАМ уже используется построчная коммутация для поочередной передачи сигналов цветности. К тому же разделение сигналов в приемнике в этом случае будет сложной задачей даже применительно к черно белому вещанию.

Разделение времени активной части строки между двумя сигналами (левая половина строки — сигнал одного изображения, правая половина строки — сигнал другого изображения) является более реальным методом, который может использоваться в промышленных установках [4.11]. Изображение рассматривается с помощью сводящих призменных очков с поляроидами для компенсации побочных изображений. Недостатком является большая естественная способность глаза конвергировать по горизонтали, что приводит к недостаточно быстрому и стабильному сведению изображений. К тому же при воспроизведении изображений рядом друг с другом их размер по горизонтали уменьшается в два раза и формат кадра перестает быть оптимальным (2 : 3 или 2,5 : 4 вместо 4 : 3 или 5 : 4).

В то же время обычно наблюдаемые природные ландшафты тоже не являются оптимальной формы, но вытянуты в другую сторону — по горизонтали.

Поэтому более предпочтительным кажется использовать для передачи стереопары деление пополам времени передачи телевизионного кадра — изображения в этом случае будут расположены на экране кинескопа друг под другом [4.27, 4.28]. Сепарация изображений, как и в предыдущем случае, осуществляется с помощью оптических призм и поляроидных пленок Формат изображений стереопары здесь будет 5 : 2 и кажется более приемлемым (естественным), чем при делении строк пополам. Примерно такой же формат получается при передаче по телевидению широкоформатных кинофильмов, однако в процессе наблюдения мы почти сразу же забываем о «неудобном» формате. Самопроизвольная (помимо очков) конвергенция глаз по вертикали здесь также отсутствует.

Опытным путем установлено, что для получения высокого качества объемного изображения нелинейность телевизионной развертки не должна превышать 16% по горизонтали и 8% по вертикали [4.1]. В первом приближении эти данные будут, очевидно, справедливы и для рассматриваемого случая.

Призменные очки необходимы для совмещения двух изображений стереопары. Левая призма так преломляет лучи, что оба изображения кажутся приподнятыми (опущенными), а правая призма, наоборот, немного опускает (приподнимает) изображе-

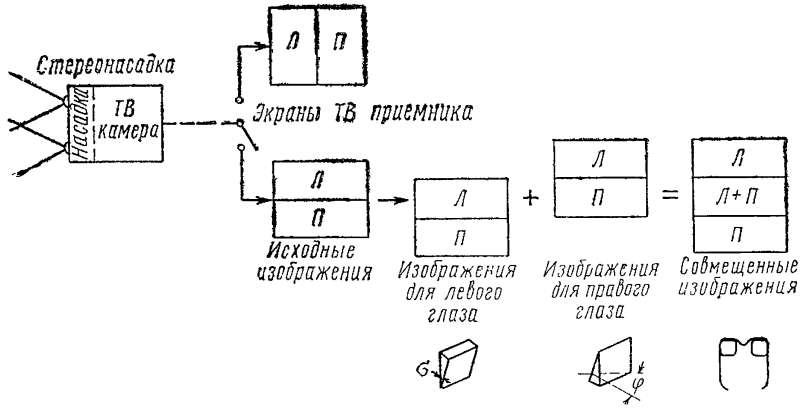


Рис. 4.32. Совмещение расположенных друг под другом изображений стереопары с помощью призменных очков

ния (рис. 4.32). В результате расположенные друг под другом изображения стереопары оказываются совмещенными и можно без дополнительных устройств наблюдать объемное изображение с яркостью порядка $B_{макс}=100$ кд/м^2, которая характерна для современных кинескопов. Сверху и снизу от совмещенных изображений стереопары будут наблюдаться по одному лишнему двухмерному изображению, которые могут быть устранены путем установки на изображения стереопары и призменные очки скрещенных поляроидных пленок или дополнительных светофильтров Однако это приведет к определенной потере яркости, что не совсем желательно.

Призменные очки рассчитываются для определенного расстояния L от экрана до наблюдателя. При этом угол у вершины каждого оптического клина очков σ должен быть таким, чтобы изображения смещались на одну четверть высоты экрана $h_э$ [4.29]

$$\sigma = \frac{\varphi}{n-1} = \frac{\operatorname{arc\,tg}\dfrac{h_э}{4L}}{n-1}, \qquad (4.18)$$

где φ — угол отклонения светового луча оптическим клином; n — показатель преломления оптического материала, из которого изготовлен клин. При $h_э \approx 40$ см, $L=5h_э=2$ м и $n=1{,}52$ (для оптического стекла типа К8) $\sigma \approx 6°$.

Смещение наблюдателя относительно расчетного расстояния наблюдения L приведет к рассовмещению изображений по вертикали. Когда это рассовмещение превысит 19 угловых минут, стереоэффект исчезнет. При расстоянии рассматривания $L \geqslant 5\ h_э$ допустимое смещение наблюдателя без потери стереоэффекта составляет несколько десятков сантиметров. Таким образом, наблюдатель, использующий клиновые очки с неперестраиваемым углом отклонения, довольно жестко «привязан» к расстоянию до телевизионного приемника.

Вертикальная четкость воспроизводимых изображений будет уменьшена в два раза, так как активные строки растра разде-

ляются между двумя изображениями. Появление нового качества изображения — объема в определенной степени оправдывает эти потери четкости. Кроме того, принципиально можно увеличить число строк каждого изображения путем оптимального перераспределения горизонтальной и вертикальной четкостей. Действительно, увеличить вертикальную четкость можно путем некоторого увеличения числа строк в телевизионном кадре в x раз за счет повышения частоты строчной развертки при сохранении кадровой частоты неизменной. В каждом изображении стереопары относительное число строк будет тогда примерно равно $x/2$. С другой стороны, увеличение скорости развертки при неизменной полосе пропускания канала связи вызовет уменьшение горизонтальной четкости в x раз, т. е. относительная четкость по горизонтали составит $1/x$. Выравнивание четкости в обоих направлениях произойдет при условии

$$\frac{x}{2} = \frac{1}{x}, \tag{4.19}$$

откуда $x^2 = 2$ и $x = \sqrt{2} = 1{,}41$.

Таким образом, число строк в каждом изображении стереопары несколько увеличивается и будет составлять не 0,5, а 0,7 от номинального, т. е. $575 : 2 \cdot 1{,}41 = 575 \cdot 0{,}7 = 405$ активных строк. Делитель синхрогенератора должен быть рассчитан на коэффициент деления $625 \cdot 1{,}41 \approx 881$. Практическое значение коэффициента должно быть или $841 = 29 \cdot 29$ при $x = 1{,}35$ или $961 = 31 \cdot 31$ при $x = 1{,}54$. Тогда в обоих делителях синхрогенератора $(25 \cdot 25)$, выполненных на двоичных счетчиках, необходимо будет только выключить определенное число обратных связей (всего их три) — одну в первом случае $(29 = 32 - 2^0 - 2')$ и две во втором $(31 = 32 - 2^0)$. Следует заметить, что выравнивание четкостей в вертикальном и горизонтальном направлениях путем увеличения числа строк можно производить лишь при условии увеличения вертикальных размеров изображений стереопары в 2 раза (до номинальных).

Система имеет частичную совместимость: на экранах всех приемников будут воспроизводиться друг над другом два почти одинаковых изображения, которые в общем пригодны для обычного наблюдения Если зритель приобретет призменные очки, то он может наблюдать и объемное изображение.

Передающая камера необходима лишь одна, а формирование на фотокатоде передающей трубки двух изображений осуществляется с помощью оптической стереоскопической насадки. Оптическая схема стереонасадки, рассчитанной и сконструированной старшим научным сотрудником ЛЭИС А. С. Фоминым, показана на рис. 4.33. Световые потоки от объекта, проходя через плоскопараллельные компенсирующие пластины *1*, преломляются и оказываются сдвинутыми вверх или вниз в зависимости от наклона пластины. Поэтому съемочные объективы *2* с базисом съемки 65 мм расположены на разных высотах. Далее световые потоки

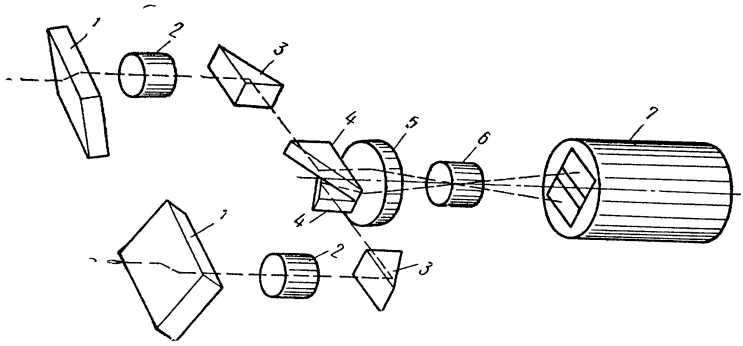


Рис. 4.33. Оптическая схема стереонасадки:
1 — компенсирующие плоскопараллельные пластины; *2* — съемочные объективы; *3*, *4* — призмы АР — 90°; *5* — коллектив; *6* — объектив переноса; *7* — передающая трубка

преломляются призмами АР—90° *3* и *4* и на их выходе формируют расположенные друг над другом изображения стереопары, которые после коллектива *5* и объектива переноса *6* проецируются на фотокатод передающей трубки *7*.

Рассматриваемая система обладает определенной гибкостью в том смысле, что позволяет использовать и другие методы разделения изображений, например обтюрационные, если они покажут свою эффективность. Частоту вертикальной развертки в приемнике необходимо увеличить в два раза, и каждое изображение стереопары будет воспроизводиться уже на полном экране. «Предъявление» изображений глазу в этом случае будет последовательным, по полям — 1-е поле верхнего изображения, 1-е поле нижнего, 2-е поле верхнего, 2-е поле нижнего и т. д. На передающем конце системы изображения, конечно, должны быть соответственно сжаты по вертикали, а сигнал синхронизации приемников должен содержать дополнительный синхронизирующий импульс в середине каждого поля, который бы обеспечивал в новом режиме стабильную чересстрочную развертку телевизионных приемников при воспроизведении каждого изображения стереопары. Это как раз тот случай, когда возможно увеличение числа строк.

На рис. 4.34 показано воспроизведение стереопары на экране приемника «Ладога-205». Призменные очки по форме и по весу практически не отличаются от обычных.

В лаборатории кафедры телевидения ЛЭИС этот метод был также экспериментально опробован в замкнутой системе цветного телевидения по видеочастоте. Схема эксперимента приведена на рис. 4.35. В качестве датчика цветной стереопары использовалась разработанная в ЛЭИС однотрубочная цветная передающая камера *1* со стереонасадкой *2*. Изображения воспроизводились на экране стандартного цветного видеоконтрольного устройства *3*, перед которым для исключения мешающих изображений помещались поляроидные пленки *4* со взаимноперпендикулярными плоскостями поляризации. Рассматривание изображений осуществлялось с помощью призменных очков *5*, также прикрытых поляроид-

ными пленками *4*. Объектом передачи *6* служила пространственная решетка с размещенными на ней дополнительными предметами. Все наблюдатели отмечали, что качество объемных изображений при введении цвета повышалось.

Таким образом, передачи по телевизионному вещанию объемных программ целесообразно осуществлять на первом этапе путем смежного воспроизведения изображений стереопары на экране

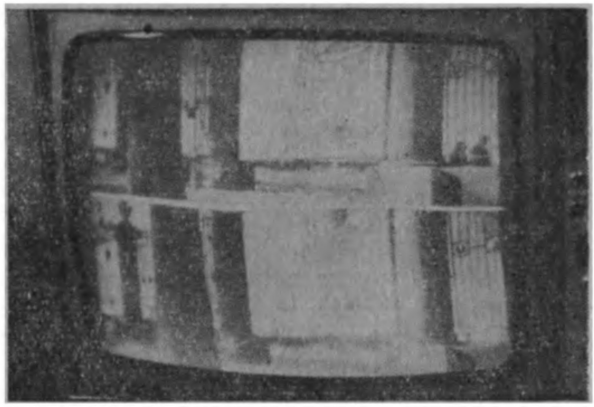


Рис. 4.34. Изображение стереопары на экране приемника

кинескопа и их совмещения зрителем с помощью призменных очков. Никаких переделок и переключений в телевизорах при этом не требуется. Для наблюдения объемных изображений используется весь парк телевизионных приемников: черно-белых и цветных. Качество цветного изображения, что очень важно, при смежном воспроизведении изображений стереопары не нарушается.

Параллельный вариант — анаглифический метод воспроизведения изображений стереопары, при котором изображения с черно-белой стереотелевизионной камеры передаются по каналу ЦТ, воспроизводятся на экране цветного приемника в разных цветах и наблюдаются через цветные очки [4.30]. Этот метод обеспечивает полную совместимость с системой ЧБТ и частичную совместимость (при выключенном канале цветности) с ЦТ. На основе использования анаглифического метода 25 марта 1975 г. была проведена первая передача с выходом в эфир по второй программе Ленинградского телецентра. В экспериментах, кроме кафедры телевидения ЛЭИС, приняли участие ряд организаций Ленинграда. Полная совместимость со всем парком черно-белых и цветных телевизионных приемников и при отсутствии каких-либо переключений в цветном приемнике может быть достигнута, если техническую реализацию анаглифического метода несколько видоизменить [4.31]. Предполагается использование для передачи стереопары одной цветной передающей камеры с одним объективом, перекрытым в плоскости диафрагмы двумя дополни-

тельными светофильтрами, например красным *Кр* и голубым *Гол* (рис. 4.36). Известно, что при увеличении относительного отверстия объектива глубина резкости уменьшается, т. е. передние и задние планы будут расфокусированы. Если точная фокусировка объектива производится по плоскости, в которой лежит точка *y*,

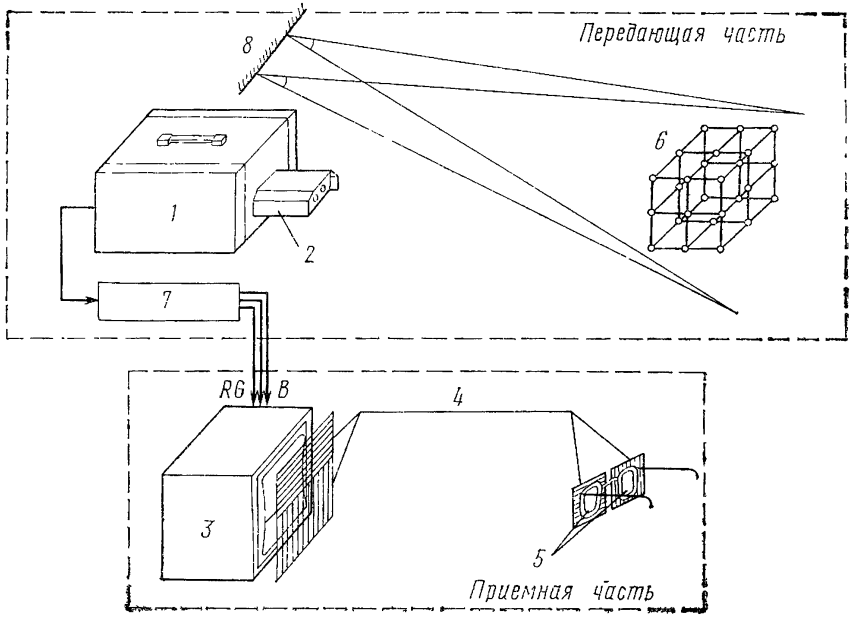


Рис 4.35 Схема проведения эксперимента:

1 — одногрубочная цветная передающая камера; *2* — стереонасадка; *3* — цветное видеоконтрольное устройство; *4* — поляроидные пленки; *5* — призменные очки; *6* — объект передачи; *7* — камерный канал, *8* — источник света

то ее изображение *y′* на фотокатоде будет представлять собой маленькую точку, цвет которой соответствует передаваемому оригиналу. Изображения же точек объекта *x* и *z* будут представлять собой кружки рассеяния *x′* и *z′*, так как плоскости их фокусировки не совпадают с плоскостью фотокатода, а работа оптики происходит не с узким параксиальным пучком света, а при достаточно большой апертуре объектива. При этом кружки рассеяния будут окрашены в два сдвинутые по горизонтали цвета — красный и голубой, т. е. наблюдается линейный параллакс. Величина параллакса зависит от удаления передаваемых планов от плоскости фокусировки, где параллакс равен нулю (кружок рассеяния минимален).

Таким образом, если зритель, наблюдающий на экране цветного телевизора приемлемое с точки зрения совместимости качество цветного изображения (несколько расфокусированное на экстремальных планах), оденет цветные очки (*Кр—Гол*), то он увидит цветное объемное изображение. Оптимальный подбор фильтров на передающей и приемной сторонах системы необходимо осуществлять не только с точки зрения охвата определенной

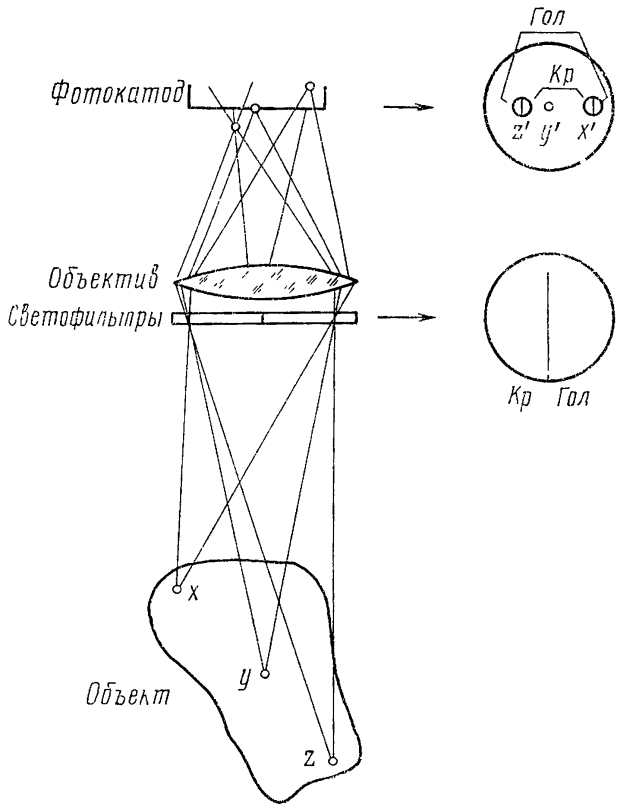


Рис 4.36. Получение линейного параллакса с помощью цветных стереосветофильтров

области цветового треугольника, но и с обязательным учетом психофизиологических аспектов бинокулярного смешения цветов. В частности, анаглифическому методу воспроизведения изображений стереопары присуща так называемая «борьба цветовых полей».

Экспериментальная проверка и опытная эксплуатация обоих рассмотренных вариантов построения стереоцветных телевизионных систем — при смежном и анаглифическом методах воспроизведения изображений стереопары — поможет определить лучший из них, который необходимо использовать для трансляции объемных программ по ТВ вещанию (в первую очередь по учебной программе).

Перспективным направлением в решении проблемы стереоцветного телевидения считается разработка цветного кинескопа с встроенным оптическим растром. Однако это достаточно сложная технологическая задача и в ближайшее время вряд ли можно рассчитывать на ее практическое решение.

Имеются также сообщения об интересных исследованиях по разработке лазерных кинескопов [4.32], которые можно будет использовать в проекционных стереоцветных установках. Лазерные кинескопы малогабаритны, обладают высоким КПД (до 20—

25%) по сравнению с существующими лазерами и имеют очень большую яркость, позволяющую проецировать изображение на экран размером до 3 м².

4.4. Особенности воспроизведения пространственных изображений

Во всех рассмотренных выше методах пространственной селекции ракурсов сущность ее заключается в том, что при воспроизведении совокупности изображений из всего рассеиваемого ими светового потока в сторону наблюдателя пропускаются только определенные его части, имеющие форму усеченной пирамиды. Одно ее основание — это плоскость совмещения изображений, другое расположено в плоскости избирательного видения. При произвольном положении наблюдателя в пространстве перед плоскостью избирательного видения каждое из двух плоских изображений наблюдаемой стереопары, которую он может произвольно менять при своем смещении относительно приемного экрана, будет состоять из отдельных полосок смежных ракурсов. Число этих полосок, из которых синтезируется наблюдаемое изображение, меняется от номинального числа выбранных ракурсов N до одного при движении наблюдателя из глубины зрительного зала к плоскости избирательного видения. Только при расположении в этой плоскости глаза наблюдателя будут видеть два «чистых» ракурса, т. е. именно такие изображения, которые фиксировались съемочными объективами. В общем же случае наблюдаемые изображения будут составными, состоящими из вертикальных полосок многих частичных изображений панорамограммы и соответствующими каким-то новым «мнимым» позициям наблюдения, находящимся в пространстве за действительными положениями передающих камер.

Этот общий случай наблюдения в настоящее время не является экономически оправданным, так как требует слишком много изображений. Только тогда ширина зон избирательного видения получается малой и наблюдение изображений можно вести из достаточно обширной зоны стереовидения, не опасаясь утери стереоэффекта. Система получится слишком сложной и, если речь идет о вещании, будет воспроизводить много избыточной информации.

При наблюдении изображений из плоскости избирательного видения ширина каждой зоны может быть выбрана предельной, т. е. равной $b_0 = 65$ мм. Ясно, что число зон здесь минимально ($N \leqslant 10$), а качество изображения должно быть наивысшим (так как изображения не составные). Поэтому ориентироваться при разработке многоракурсных ТВ систем надо, по-видимому, именно на этот вариант.

Таким образом, при проектировании многоракурсной системы можно исходить из следующих ориентировочных априорных данных:

1) ширина зоны должна быть равна среднему значению глазного базиса $b_з = b_0 = 65$ мм;

2) число зон избирательного видения $N \leqslant 10$;

3) число повторений зон (мультипликаций) равно 3;

4) зоны должны быть ориентированы для сидящего человека, т. е. находиться от пола на расстоянии около 120 см;

5) высота зон $H_з \approx 50$ см;

6) яркость наблюдаемых изображений не должна быть менее 50 кд/м^2;

7) в пределах зоны яркость не должна меняться;

8) пространственные искажения воспроизводимых изображений должны отсутствовать.

Последующий материал этого параграфа посвящен более подробному рассмотрению искажений воспроизводимого пространства и выбору числа зон.

Угловая плотность повторения ракурсов

Одним из важнейших параметров многоракурсных телевизионных систем является угловая плотность повторения ракурсов, которая характеризуется угловым интервалом $\Delta\varphi$, на который смещаются передающие камеры друг относительно друга. На кафедре телевидения ЛЭИС были проведены статистические эксперименты по определению этого параметра. В предварительных опытах использовались растровая и голографическая селекции ракурсов, однако окончательные и достоверные данные были получены с помощью описанной выше обтюрационной системы типа бегущей щели. Предпочтение этому типу селекции ракурсов было отдано с точки зрения обеспечения наибольшей чистоты эксперимента. В самом деле, в отличие от растровых методов здесь полностью отсутствуют зоны помех, а также не используются дополнительные процессы записи и воспроизведения световой волны на светочувствительную поверхность, присущие голографическому методу и ухудшающие качество изображения.

В качестве первого приближения результаты по определению угловой плотности повторения ракурсов, полученные для обычных многоракурсных систем, можно распространить и на системы с передачей дискретных участков голограмм (имея в виду необходимость их дальнейшего уточнения с учетом имеющейся специфики). А таких достоверных результатов до последнего времени не было даже для обычных многоракурсных систем. Поэтому в 1971 г. на кафедре телевидения ЛЭИС была проведена работа по теоретическому и экспериментальному определениям количества изображений, необходимых для построения многоракурсной системы с достаточно плавным боковым обзором воспроизводимого объемного изображения. Теоретический анализ на основе учета порога глубинного зрения и разрешающей способности глаза показал, что величина допустимого углового сдвига между передающими камерами $\Delta\varphi$ обратно пропорциональна глубине передаваемой сцены ΔL и прямо пропорциональна удалению камер от центра сцены L. Полученные результаты могут быть представлены в виде семейст-

ва кривых $\Delta\varphi = f(\Delta L;\ L)$ (рис. 4.37). При этом оглядывание многоракурсного изображения будет плавным, так как изменение глубинного расположения деталей объекта, а также величина их взаимного перекрытия в изображениях соседних ракурсов не будут превышать соответственно порога глубинного зрения и раз-

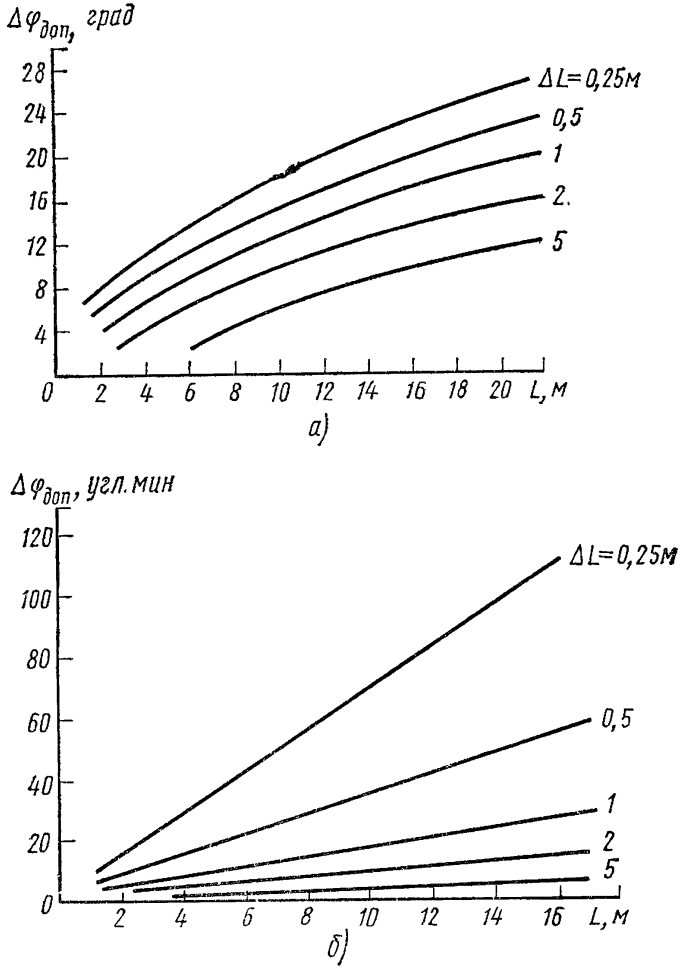


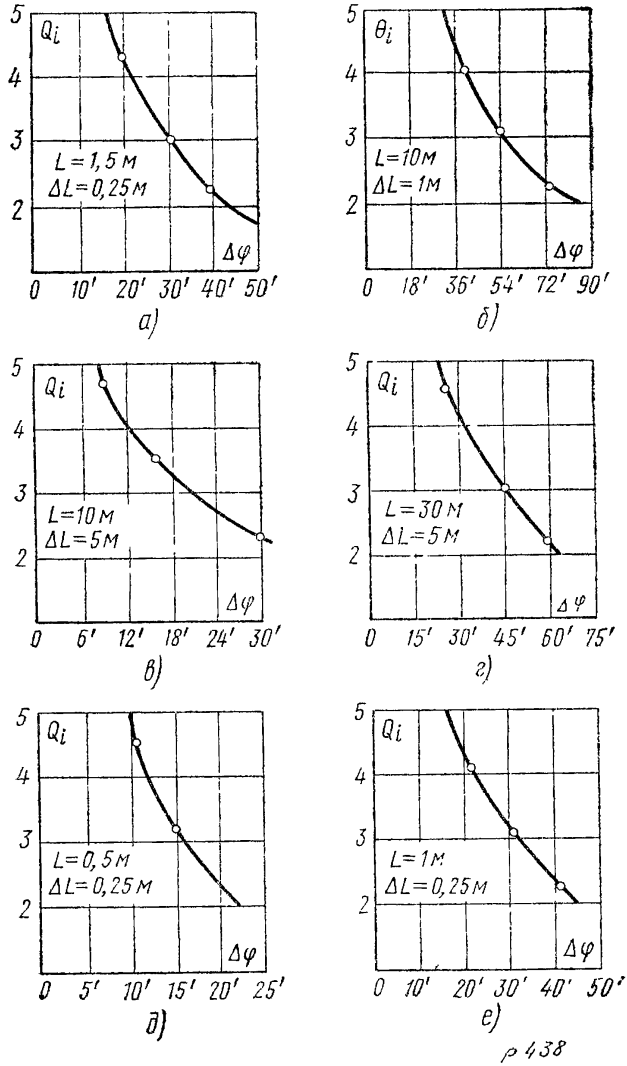
Рис. 4.37 Зависимость допустимого углового сдвига передающих камер соседних ракурсов от ΔL и L при учете порога глубинного зрения (*а*) и разрешающей способности глаза (*б*)

решающей способности глаза. Дальнейшее увеличение числа воспроизводимых изображений различных ракурсов уже не приведет к какому-либо заметному улучшению плавности оглядывания телевизионного многоракурсного изображения. Из графиков можно видеть, что расчетная величина $\Delta\varphi$ определяется только условием плавности взаимного перекрытия деталей наблюдаемого объекта при его оглядывании.

Во время экспериментов воспроизводилось от четырех до восьми изображений различных ракурсов. При изменении позиции зритель попадал в участки избирательного видения, соответствую-

щие другим ракурсам, за счет чего осуществлялся эффект бокового обзора. Частота воспроизведения каждого изображения составляла 50 Гц. Источниками тестовых изображений являлись черно-белые и цветные диапозитивы, полученные фотографическим способом с различных позиций относительно объектов, отражающих достаточно широкий круг встречающихся в телевидении сюжетов. В статистических экспериментах использовалась четырехградационная шкала оценок Q_i: граница между изображениями соседних ракурсов в зоне стереовидения не заметна (оценка 5); едва заметна (4); заметна, но еще допустима (3); сильно заметна и недопустима при оглядывании (2).

Результаты статистического эксперимента, которые также представлены в виде соответствующих графиков на рис. 4.38, по-



р 4.38

Рис. 4.38. Зависимость оценки степени плавности оглядывания многоракурсных изображений от Δφ

казывают, что практические допуски на угловые интервалы между соседними ракурсами могут быть в 2—2,5 раза менее жесткими, чем теоретически вычисленные, при этом качество многоракурсного изображения можно считать хорошим. Так, например, если для частного случая студийной телевизионной передачи теоретический расчет дает $\Delta\psi = f(\Delta L = 5 \text{ м}; L = 20 \text{ м}) = 10'$, то при практическом проектировании многоракурсной системы можно принять с учетом результатов статистического эксперимента $\Delta\psi = 20' \div 25'$.

Соответственно, если известны условия записи голограммы (ΔL и L), то полученные результаты могут быть использованы для определения степени ее дискретизации, т. е. для определения допустимого расстояния между соседними выборками.

Искажения воспроизводимого пространства

Степень рельефности или стереоскопичности пространственных изображений определяется величиной полной пластики $П$ [4.7, 4.11]

$$П = \nu n, \tag{4.20}$$

где $\nu = \frac{H_{из}}{H_{пр}}$ — увеличение телевизионной и оптической систем, показывающее, во сколько раз изображение на приемном экране больше натурального размера предмета; $n = \frac{b}{b_0}$ — удельная пластика системы, равная отношению базиса передачи к глазному базису.

Полная пластика показывает, во сколько раз наблюдаемое изображение рельефнее натуры. Увеличение полной пластики достигается как путем увеличения базиса съемки, так и за счет масштабирования геометрических размеров В первом случае больший разнос точек съемки приводит к увеличению радиуса стереоскопического видения, который, как известно, является функцией базиса съемки и остроты бинокулярного зрения $\Delta\theta$:

$$r = \frac{b}{\Delta\theta}. \tag{4.21}$$

Уменьшение знаменателя этого выражения, которое будет при увеличении размеров изображения по сравнению с предметом и увеличения вследствие этого всех углов в ν раз, также увеличивает значение r.

В настоящее время возникает потребность в создании стереосистем, в которых необходимо геометрически точное воспроизведение пространственной модели объектов Воспроизведение многоракурсного изображения дает принципиальную возможность для наблюдения неискаженной пространственной геометрии трехмерных объектов за счет восприятия в различных точках зоны стереовидения изображений соответствующих ракурсов [4.33]. Подобные

системы могут быть созданы как для измерительных целей, так и для создания комплексов управления различными движущимися объектами, когда для повышения точности управления требуется восприятие третьего измерения объектов.

Наблюдаемый пространственный образ объекта в многоракурсной ТВ системе, как и в любой оптической системе, не будет подвержен геометрическим искажениям только при соблюдении условий ортостереоскопии. Согласно [4.7], условием ортостереоскопии является равенство коэффициентов продольного и линейного увеличения стереосистемы, т. е. $\beta_{ст}=\nu_{ст}$, где $\beta_{ст}$ — стереоскопическое продольное увеличение системы; $\nu_{ст}$ — стереоскопическое линейное увеличение системы. Это условие выполняется при коэффициенте углового увеличения системы $\Gamma=1$. На рис. 4.39*а, б* показана схема получения пространственного изображения объекта, ограниченного контуром квадрата $ABCД$, в многоракурсной телевизионной системе, построенной с соблюдением условия ортостереоскопии. Из рисунка видно, что

$$\nu_{ст}=\frac{ad}{AD}=M,\ \beta_{ст}=\frac{ab}{AB},\ \Gamma=\frac{\psi'}{\psi},$$

где ad — линейный размер объекта в воспроизводимом ТВ изображении; AD — действительный линейный размер наблюдаемого объекта; M — масштабный коэффициент ТВ системы; ab — видимая глубина стереоскопического изображения; AB — действительная глубина наблюдаемого объекта; ψ' — угол бокового обзора воспроизводимого многоракурсного изображения; ψ — угол бокового обзора объекта совокупностью ТВ камер.

При коэффициенте $\Gamma=1$ (см. рис. 4.39*а, б*) ΔQ_1OQ_n и $\Delta O_1O'O_n$, а также $\Delta a'_1d'_nQ$ и $\Delta a_1d'_nQ'$ подобны, откуда следует, что

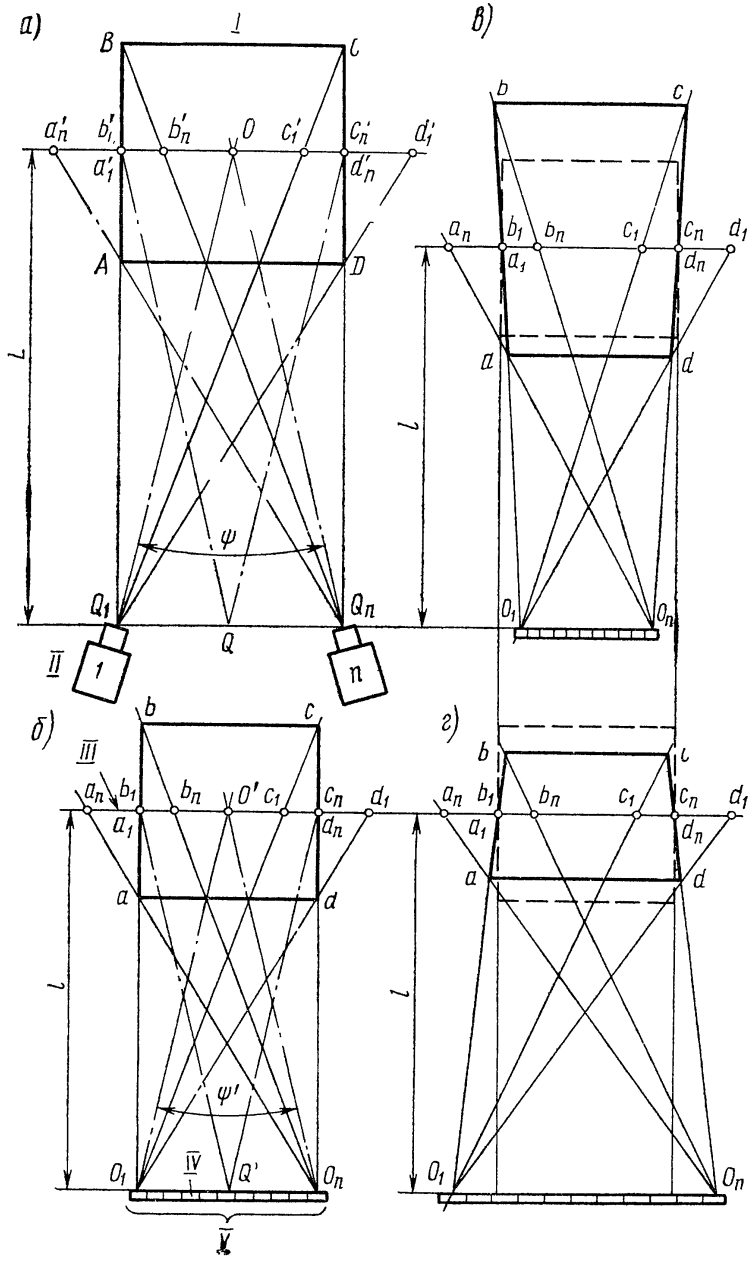
$$\frac{l}{L}=-\frac{O_1O_n}{Q_1Q_n}=\frac{ab}{AB}=M, \qquad (4.22)$$

где l — расстояние от ТВ экрана до зоны стереовидения многоракурсного изображения; L — расстояние от центральной плоскости объекта до передающих камер; O_1O_n — воспроизводимая ширина зоны стереовидения многоракурсного изображения; Q_1Q_n — базис передачи, равный расстоянию между объективами передающих камер на границах зоны оглядывания.

Из выражения (4.22) видно, что для воспроизведения геометрически неискаженного (ортостереоскопического) пространственного изображения объекта в многоракурсной ТВ системе достаточно выполнить два соотношения:

$$\frac{l}{L}=M \text{ и } \frac{O_1O_n}{Q_1Q_n}=M.$$

На рис. 4.39 представлены схемы получения пространственных изображений объекта при различных соотношениях l/L и $-\frac{O_1O_n}{Q_1Q_n}$, причем для удобства геометрических построений выбрано такое расположение граничных точек зоны оглядывания Q_1 и Q_n, при



котором совпадают проекции точек A и B на вертикальной плоскости $a'_1b'_1c'_1d'_1$ и точек C и D на вертикальной плоскости $a'_nb'_nc'_nd'_n$. Нахождение мест расположения точек изображения осуществляется следующим образом: точки a и b определяются путем пересечения линии $O_1a_1b_1$ с линиями O_na_n и O_nb_n, а точки c и d путем пересечения линии $O_nc_nd_n$ с линиями O_1c_1 и O_1d_1.

При выполнении соотношения (4.22), т. е. если $\frac{L}{l} = M$, и

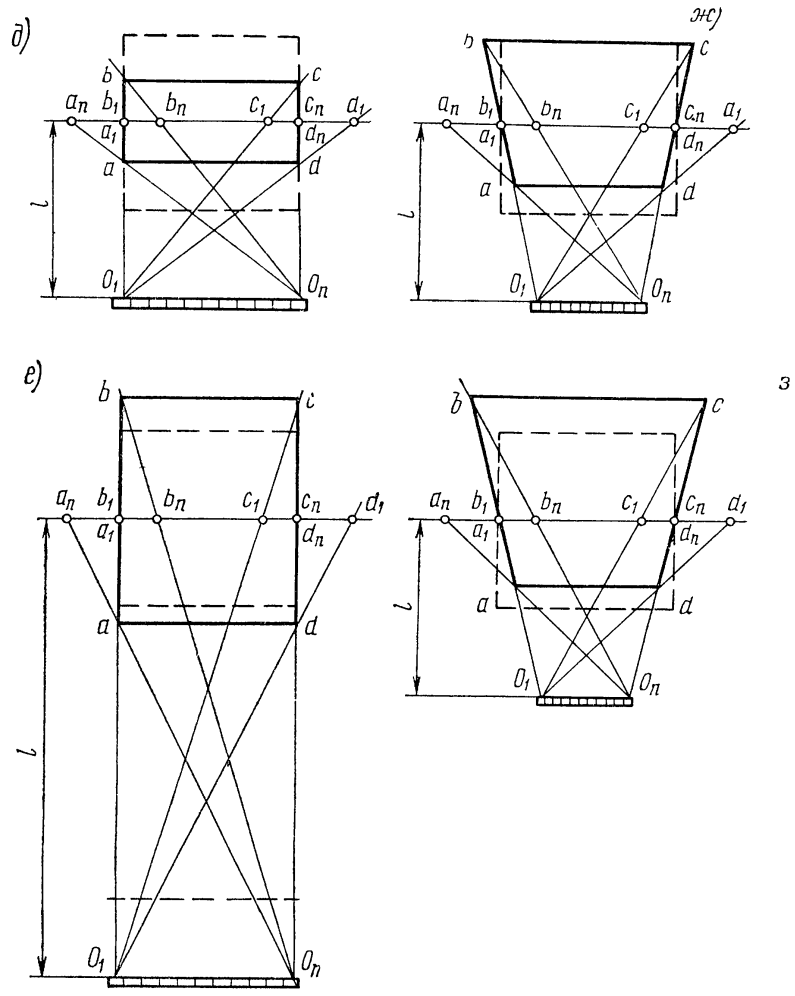


Рис 4.39. Схемы получения пространственного изображения объекта

а — схема передающей части многоракурсной ТВ системы; *б* — схема получения неискаженного пространственного изображения; *в*, *г* — искажения пространственного изображения при изменении ширины зоны стереовидения; *д*, *е* — искажения при изменении расстояния от ТВ экрана до зоны стереовидения, *ж*, *з*) искажения при уменьшении ширины зоны стереовидения и расстояния *l*

I — объект; *II* — передающая камера, *III* — экран, *IV* - зона видения изображения одного ракурса; *V* — зона стереовидения многоракурсного изображения

$\frac{O_1O_n}{Q_1Q_n} = M$ (рис. 4.39*б*), воспроизводимое пространственное изображение *abcd* геометрически подобно самому объекту *ABCD*. В этом случае зрители будут вполне естественно воспринимать как уменьшенное, так и увеличенное пространственное изображение объекта, а степень оглядывания многоракурсного изображения, как и при наблюдении самого объекта, будет соответственно увеличиваться или уменьшаться в зависимости от величины

масштабного коэффициента M ТВ системы. При этом наблюдатель, рассматривая пространственные изображения, являющиеся уменьшенными или увеличенными макетами предметов, должен будет представлять себя карликом или великаном, что в какой то мере затрудняет восприятие объема. Кроме того, за счет психофизиологического подравнивания изображение кажется увеличенным и удаленным от наблюдателя или соответственно уменьшенным и приближенным к нему. Только в одном случае (при $M=1$) многоракурсное изображение будет точной оптической копией наблюдаемого объекта.

Если же $\frac{O_1O_n}{Q_1Q_n} \neq M$ (пусть $O_1O_n < Q_1Q_n$) (рис. 4.39*в*), то пространственно изображение объекта искажается — не только вытягивается по глубине, но и деформируется по ширине — в переднем плане оно сужается, а в дальнем — расширяется, т. е. $bc > ad$. Кроме того, уменьшение ширины зоны стереовидения многоракурсного изображения против нормального приводит к уменьшению угла ψ' и, следовательно, к повышению угловой плотности повторения изображений различных ракурсов, что, естественно, сказывается в подчеркивании объема ($\beta_{ст} > M$).

Если же угловую плотность повторения изображений различных ракурсов искусственно уменьшать путем расширения зоны стереовидения $\left(\frac{O_1O_n}{Q_1Q_n} > M\right)$ (рис. 4.39*г*), то восприятие трехмерного объема уменьшится, а геометрическое искажение пространственных изображений приобретет другой знак по сравнению с предыдущим случаем, т. е. произойдет расширение передних планов и сжатие дальних.

Геометрическое построение, выполненное для случая, когда $\frac{O_1O_n}{Q_1Q_n} = M$, а $\frac{l}{L} \neq M$, показывает, что при этом происходит только сжатие или растяжение пространственного изображения по глубине без деформации изображения по ширине (рис. 4.39*д*, *е*). Приближение плоскости избирательного видения (например физической плотности обтюрационного селектора) к экрану уменьшает рельефность пространственных изображений, а удаление — повышает ее по той же указанной выше причине — соответствующего изменения, уменьшения или увеличения угловой плотности повторения ракурсов.

Рассмотрим еще общий случай наблюдения, когда ни расстояние от экрана до плоскости избирательного видения, ни ее ширина не соответствуют заданному размеру изображения:

$$\frac{l}{L} \neq M \text{ и } \frac{O_1O_n}{Q_1Q_n} \neq M.$$

Практически из четырех возможных вариантов имеет смысл рассмотреть только случай, когда $l < ML$, так как это отступление иногда может быть оправдано получением более компактной установки, и $O_1O_n < MQ_1Q_n$, так как уменьшение рельефности изо-

бражений при приближении плоскости O_1O_n к экрану (рис. 4.39*д*) может быть в какой-то степени скомпенсировано сужением этой плоскости по ширине (рис. 4.39*в*). Однако неискаженный объем здесь получить нельзя вследствие неодинаковых геометрических искажений в предэкранном и заэкранном пространствах. На рис. 4.39*ж* показан случай, когда геометрические искажения по глубине в заэкранном пространстве скорректированы, а на рис. 4.39*з* имеет место перекоррекция.

Из рассмотренных примеров построения многоракурсных телевизионных систем видно, что степень и вид геометрических искажений зависят от соотношения между l и L, а также O_1O_n и Q_1Q_n. Воспроизведение геометрически неискаженного пространственного изображения происходит только при выполнении в многоракурсной телевизионной или оптической системах условия ортостереоскопии.

Интересно, что кроме обычных методов сепарации изображений, когда зоны избирательного видения расположены между зрителями и экраном и пространственно соответствуют расположению объективов относительно объекта, принципиально возможно и инверсное их расположение, когда экран находится непосредственно перед зрителями, а зоны избирательного видения — за ним. Объемный образ, хотя и несколько искаженный (рис. 4.40), здесь также можно получить, несмотря на наличие некоторого парадокса, заключающегося в том, что в этом случае изображения не рассматривают через щели, а просматривают на фоне синтезированного окна из узких вертикальных ярких щелей, порядок расположения которых в горизонтальном направлении изменен на обратный. Подобная особенность воспроизведения пространственных изображений приводит к тому, что приближение наблюдателя к экрану не ведет к увеличению панорамы; наоборот, поле зрения сужается, так как оно ограничивается сечением экраном конуса лучей с вершиной в глазу и основанием в мнимой плоскости расположения щелей. Конечно, свет, идущий от каждой щели, должен освещать одно частичное изображение панорамограммы и диффузно не рассеиваться на его структуре. Этим условиям можно удовлетворять, если изображения фокусировать на дифракционный голографический экран (см. «Голографический экран» в разделе 4.2), восстанавливающий световую волну, как будто распространяющуюся от мнимого изображения щели.

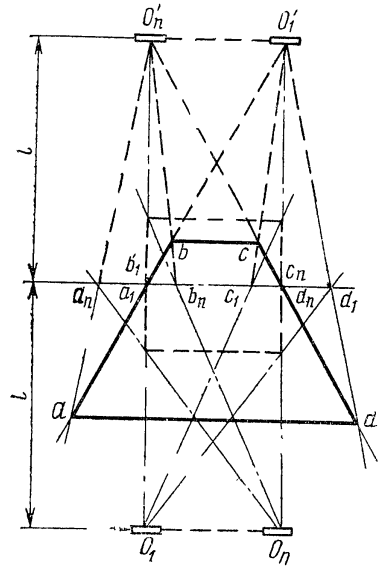


Рис. 4.40. Формирование пространственных изображений при перенесении плоскости избирательного видения в заэкранное пространство

Геометрия наблюдаемого пространства в многоракурсных системах не изменяется при смещении наблюдателя, так как в процессе движения наблюдатель не связан с одной и той же стереопарой, как в стереоскопических системах, а использует все новые автоматически меняющиеся стереопары. Вследствие этого воспроизводимое пространство кажется объективной реальностью, имеющей вполне определенные пространственные координаты, не зависящие от условий наблюдения. Кроме того, большое значение имеет пропадание кулисности из-за наличия эффекта бокового

обзора. Все это существенно повышает восприятие рельефа. Основные сведения по воспроизведению стереоскопических изображений и деформации наблюдаемого пространства, которые полностью применимы и для многоракурсных систем, изложены в [4.7], а телевизионная специфика этого вопроса рассмотрена в [4.11].

Канал связи многоракурсной телевизионной системы должен быть достаточно широкополосным. В общем случае его полосу пропускания необходимо увеличить по сравнению со стандартным телевизионным каналом во столько раз, сколько частичных изображений содержит панорамограмма. Однако полосу частот в такой системе можно будет, очевидно, значительно сократить, если тщательно исследовать возможность применимости всех известных «классических» и попытаться изыскать новые способы сокращения количества необходимой для передачи информации. Например, выигрыш в 4 раза можно получить при допустимости уменьшения разрешающей способности в 2 раза. В некоторых случаях (при передаче сюжетов со слабо выраженной динамикой движения) возможно уменьшение числа кадров, скажем, с 25 до 5. Эти два допущения, приводящие, правда, к снижению качественных параметров изображений, уже позволяют передать по стандартному телевизионному каналу панорамограмму, состоящую из 20 изображений. Полезно также продолжить применительно к многоракурсным телевизионным системам исследования, выполненные в свое время для стереоскопической системы по изучению возможности снижения четкости одного из изображений стереопары [4.11].

Список литературы

1.1. **Квантовая** электроника М, «Сов энциклопедия», 1969, с. 11—34, 93—105, 110—115, 165—178, 263—270, 355—371.

1.2. **Сороко Л. М.** Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971, с. 11—44.

1 3. **Ищенко Е. Ф., Климков Ю. М.** Оптические квантовые генераторы. М, «Советское радио», 1968 470 с

1 4. **Островский Ю. И.** Голография и ее применение Л, «Наука», 1973 179 с.

1 5. **Федоров Б. Ф.** Лазеры и их применение М., Изд-во ДОСААФ, 1973 160 с.

1 6. **Микаэлян А. Л., Тер-Микаэлян М. Л., Турков Ю. Г.** Оптические генераторы на твердом теле М, «Советское радио», 1967. 384 с.

1 7 **Аллен Л., Джонс Д.** Основы физики газовых лазеров. М, «Наука», 1970. 207 с.

1.8 **Базаров В. К.** Полупроводниковые лазеры и их применение. М, «Энергия», 1969. 56 с

1.9. **Самойлов В. Ф., Дроханов А. Н.** Перспективы применения лазеров в приемных телевизионных устройствах. — «Техника кино и телевидения», 1973, № 1, с 52—59

1 10 **Франсон М., Сланский С.** Когерентность в оптике. М, «Наука», 1967. 80 с.

1 11. **Мелехин Г. В.** и др Газовые лазеры для голографии. — В кн: Материалы II Всесоюзной школы по голографии. Л, 1971, с. 243—251.

1 12. **Прохоров А. М., Карлов Н. В.** Квантовая электроника. — В кн.: 80 лет радио Научно-технический сборник под ред. А. Д. Фортушенко. М., «Связь», 1975, с. 237—249

1 13 **Аркадьев Д. И., Милинкис Б. М.** Использование лазеров в телевидении — «Техника кино и телевидения», 1969, № 5, с. 52—57.

1.14. **Лазерные** телевизионные установки — «Техника кино и телевидения», 1969, № 11, с. 84—86

1.15 **Насибов А.** Лазерный кинескоп. — «Радио», 1973, № 11, с 14—16.

1 16 **Лэйт Э., Упатниекс Ю.** Фотографирование с помощью лазера. — «Успехи физических наук», 1965, т 87, вып. 3, ноябрь, с. 521—538.

1 17. **Строук Дж.** Введение в когерентную оптику и голографию. М, «Мир», 1967 347 с.

1 18 **Кок У. Е.** Лазеры и голография. М, «Мир», 1971. 136 с.

1 19 **Франсон М.** Голография М, «Мир», 1972. 246 с.

1 20 **Де Велис Дж., Рейнольдс Дж.** Голография М, Воениздат, 1970. 248 с.

1 21 **Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.** Оптическая голография. Пер с англ под ред Ю И Островского. М, «Мир», 1973. 686 с.

1 22 **Лабораторные** работы по голографии. Учеб пособие. Минск, изд БГУ им В. И Ленина, 1975 135 с.

1.23 **Константинов Б. П.** и др. Передача голограммы по стандартному фототелеграфному каналу с ограниченным числом полутонов. — «Журнал технической физики», 1969, т. 39, вып. 2, с. 347—353

1 24. **Дойл.** Голографический способ видеозаписи в телевидении — «Электроника», 1969, № 23, с 14—20

1 25 **Тельнов Н. И.** Системы записи телевизионных изображений EVR и Selectavision — В кн Современные системы записи и воспроизведения изображения Сб статей, составитель В. И Ушагина М, «Искусство», 1972, с. 203—231.

1 26. **Мустафин К. С.** Методы получения копий голограмм — В кн · Материалы III Всесоюзной школы по голографии. Л., 1972, с. 364—377.

1.27. **Денисюк Ю. Н.** Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения — «ДАН СССР», 1962, т. 144, № 6, с 1275—1278

1 28. **Протас И. Р.** Свойства фотографических материалов для голографии. — В кн.: Материалы I Всесоюзной школы по голографии. Л., 1971, с. 502—514.
1 29. **Васильева Н. В., Кириллов Н. И.** Особенности регистрации голографических изображений и требования к фотоматериалам для голографии. — В кн.: Материалы III Всесоюзной школы по голографии. Л., 1972, с. 339—354.
1.30. **Синцов В. Н.** Использование необычных регистрирующих сред в голографии. — «Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии», 1970, т. 15, вып. 5, с. 298—305.

К гл. 2

2.1. **Марешаль А., Франсон М.** Структура оптического изображения. Под ред. Г. Г. Слюсарева. Перевод с франц. Н. Н. Губеля. М., «Мир», 1964.
2 2. **Дитчберн Р.** Физическая оптика. М., Наука», 1965. 631 с.
2 3. **Михель К.** Основы теории микроскопа. М., Гос. изд. техн.-теорет. лит., 1965. 276 с.
2 4. **Франсон М., Сланский С.** Когерентность в оптике. М., «Наука», 1967. 80 с.
2 5 **О'Нейл Э.** Введение в статистическую оптику. М., «Мир», 1966. 254 с.
2 6. **Лебедев Д. С., Цуккерман И. И.** Телевидение и теория информации. М.—Л., «Энергия», 1965. 219 с.
2.7. **Enloy L. H.** Noise — Like Structure in the Image of Diffusely Reflecting Objects in Coherent Illumination. — «The Bell Syst. Thechn. J.», 1967, v. XLYI, N 7, p. 1479.
2 8. **Рыфтин Я. А.** Телевизионная система. М., «Советское радио», 1967. 271 с.
2.9. **Оценка** качества оптического изображения. Сборник докладов. М., Геодезиздат, 1959. 304 с.
2.10. **Бабенко В. С.** Оптика телевизионных устройств. М.—Л., «Энергия», 1964. 256 с.
2 11. **Гуревич С. Б.** Физические процессы в передающих телевизионных трубках. М., Гос. изд. физ.-мат. лит. 1958. 339 с.
2.12. **Строук Дж.** Введение в когерентную оптику и голографию. Пер. под ред. Л М. Сороко. М., «Мир», 1967. 347 с
2.13. **De Bitteto D. J.** Bandwidth reduction of Holograms Trasmission Systems Elimination of Vertical Parallax. — «Appl. Phys. Letters», 1968, v. 12, N 5, p. 176—178.
2.14. **Burckhardt C. B.** Information Reduction in Holograms for Visual Display. — «J. Opt. Soc. Am.», 1968, v. 58, N 2, p. 241—246.
2.15. **Lin L. H.** A Method of Hologram Information Reduction by Spatual Frequensy Sampling. — «Appl Optics», 1968, v. 7, N 3, p. 545—548.
2 16. **Kock W. E.** Hologram televisoin. — «Proc. IEEE», 1967, v. 55, N 3, p. 331.
2 17. **Haines K. A., Brumm D. B.** A technique for Bandwidth Reduction in Holographie Systems. — «Proc. IEEE», 1967, v. 55, N 8, p. 1512—1513.
2.18. **«JOSA»**, 1967, October, v. 42, p. 733—742.
2.19. Doo Ley R. P. X-band holography. — «Proc. IEEE», 1965, v. 53, N 11, p. 1733—1735.

К гл. 3

3.1. **Leith E., Upatnieks J., Hildebrand B., Haines K.** Requirements for a wavefront reconstruction television facsimile system. — «Journal SMPTE», 1965, v. 74 p. 893—896.
3 2. **Гуревич С. Б.** Физические процессы в передающих телевизионных трубках. М., Гос. изд. физ.1мат. лит., 1958. 339 с.
3 3. **Дитчберн Р.** Физическая оптика. М., «Наука», 1965. 631 с.
3 4. **Rogers G. L.** The design of experiments for recording and reconstructio three — dimensional objects in coherent light (holography). — «J. Scien Instr», 1966, v. 4, N 10, p. 677—684.
3 5. **«Laser Focus»**, 1968, August, p. 20—24.

3.6. **Телевидение.** Под ред. П. В. Шмакова. М., «Связь», 1970. 538 с.
3.7. **Орловский Е. Л.** Теоретические основы электрической передачи изображения. М., «Советское радио», 1962
3.8. **«Laser Focus»**, № 9, 1967, p. 39—30.
3.9. **Fowler V. J., Schafer A.** Survey of Laser Beem Deflection Techniques. — «Proc. IEEE», 1966, v. 54, N 10, p. 1437—1444.
3.10. **Насибов А. С.** Лазерные кинескопы. — «Радио», 1973, № 11, с. 14—16.
3.11. **Enloy L. H., Jakes W. C., Rubinstein G. B.** Hologram heterodyne Scaners. — «Bell Syst. Techn. J.», 1968, v. 47, N 9, p. 1875—1882.
3.12 **James C. Wyant, Parker Givens M.** Effect of the Photographic Gamma on the Luminance of Hologram Reconstructions. — «JOSA», 1968, v. 58, N 3, p. 357.
3.13. **Kosma A.** Photographic Recording of Spatially Modulated coherent Light. — «JOSA», 1966, v. 56, N 4, p. 428—432.
3.14. **Tokarski J. M. J.** The Effect on the Hologram Record of a Nonlinear Relationship Between Amplitude Transmission and Exposure. — «Appl. Opt.», 1968, v. 7, N 5, p. 989—990.
3.15. **Nishida N.** Reconstruction of Negative Image in Holography. — «Appl. Opt.», 1968, v. 7, N 9, p. 1862
3.16. **Тачков А. Н., Медведев Э. В., Друзин Я. В.** Некоторые вопросы практического получения голограмм — В кн.: Материалы НТК ЛЭИС Л., 1968, вып 3. с. 128—133.
3.17. **Enloe L. H., Murphy J. A., Rubinshtein G. B.** Hologram transmission via television. — «Bell. Syst. Techn. J.», 1966, v. 45, N 2, p. 335—339.
3.18. **Клименко И. С., Рукман Г. И.** К вопросу о восстановлении волнового фронта с голограмм, переданных по телевизионному тракту. — «Журнал технической физики», 1967, т. 37, № 8, с. 1532.
3.19. **Гуревич С. Б., Гаврилов Г. А., Константинов А. Б., Константинов В. Б., Островский Ю. И., Черных Д. Ф.** Голографическая передача изображений через телевизионную систему. — «Журнал экспериментальной и технической физики», 1968, т 38, № 3, с. 513.
3.20. **Шмаков П. В., Жебель Б. Г., Копылов П. М., Медведев Э. В., Тачков А. Н.** Передача голограмм по телевизионному каналу — «Техника кино и телевидения», 1969, № 10, с. 42—47.
3.21. **Константинов Б. П., Гуревич С. Б., Гаврилов Г. А., Колесников А. А., Константинов А. Б., Ризкин А. А., Черных Д. Ф.** Передача голограмм по стандартному фототелеграфному каналу с ограниченным числом полутонов — «Журнал технической физики», 1969, т. 39, вып. 2, с. 347—353
3.22. **Шмаков П. В., Копылов П. М., Медведев Э. В., Тачков А. Н., Гаврилов Л. В.** Передача голограмм — «Техника кино и телевидения», 1969, № 9, с. 46—47.
3.23. **Миллер В. А., Куракин А. А.** Приемные электронно-лучевые трубки. М.—Л., «Энергия», 1964. 368 с.
3.24. **Шверник Л. Н., Судравский Д. Д.** Электронно-оптические преобразователи для телевизионных воспроизводящих устройств с большим экраном — «Техника кино и телевидения», 1963, № 8. 21 с
3.25. **Власов Г. И., Цикрызов В. Г.** Перспективы использования оптических квантовых генераторов в телевидении. — «Вопросы радиоэлектроники», сер. 9, 1968, вып. 2.
3.26. **Шверник Л. Н., Судравский Д. Д.** Телевизионный проектор с электронно-оптическим модулятором света: — «Техника кино и телевидения», 1963, № 10, 79 с.
3.27. **Smith G. P.** Chameleon in the sun: photochromic glass. — «IEEE Spectrum», 1966, v. 3, N 12, p. 39—47.
3.28. **Megla G. K.** Optical properties and application of photochromic glass. — «Appl. Opt.», 1966, N 6, p. 945—960.
3.29. **Norman M. Carfinkel.** Photochromic Glass Silver Ion Exchange. — «Appl. Opt.», 1968, v. 7, N 5, p 789.
3.30. **Kiss Z. J.** Photochromic materials for quantum electronic. — «J. Quant. E.», 1969, v. QE-5, N 1, p. 12—17.

3.31. **Zilberstein R. M.** A storage tube with photochromic glass faceplate. — «Electr. Communic.», 1967, v. 2, N 1.
3 32. **Турыгин И. А.** Прикладная оптика. М., «Машиностроение», 1966, т. 1, 2, с. 362, 431
3 33. **Тачков А. Н.** Восстановление изображений с голограмм, синтезированных из отдельных участков — В кн.: Труды НТК ЛЭИС. Л., 1969, вып. 2, с 80—85
3.34. **Don B.** Neuman. Geometrical Relationships Between the Original Object and the Two Images of a Hologram Recostruction. — «JOSA» 1966, v. 56, N 7, p. 858.
3 35. **Капани Н. С.** Волоконная оптика. Принципы и применение. М., «Мир», 1969 464 с.

К гл. 4

4 1. **Шмаков П. В.** Основы цветного и объемного телевидения М., «Советское радио», 1954 303 с.
4 2. **Шмаков П. В., Копылов П. М.** Стереотелевидение и голография — «Техника кино и телевидения», 1972, № 5, с. 47—53
4 3 **Копылов П. М., Медведев Э. В.** Экспериментальное исследование визуальной разрешающей способности в когерентном свете. — В кн: Материалы НТК ЛЭИС. 1971, с. 41—45
4 4 **Иванов Б. Т.** Стереокинотехника. М, «Искусство», 1956. 216 с.
4 5 **Шмаков П. В.** Цветное телевидение. — В кн. Научно-технический сборник «Телевизионная техника» М., «Связь», 1971, с 94—127
4 6. **Collier Robert J.** Holography and integral photography. — «Physics Today» 1968, v. 21, N 7, p. 54—63.
4 7 **Валюс Н. А.** Стереоскопия М, изд АН СССР, 1962 379 с
4 8. **Пчелиный** глаз в фотокамере — «Изобретатель и рационализатор», 1969, № 4, с 21
4 9 **Шмаков П. В., Жебель Б. Г., Копылов П. М., Медведев Э. В., Тачков А. Н.** Воспроизведение объемных изображений с использованием когерентного света — «Электросвязь», 1970, № 2, с 5—10.
4 10 **Fourreau P.** La télévision en relief et en couleurs — «Télévision», 1969, N 192—193, p. 35—38; p. 71—75.
4 11 **Шмаков П. В., Колин К. Т., Джакония В. Е.** Стереотелевидение. М., «Связь», 1968 207 с
4 12 **Lu Sun.** 3-D holographic images from 2-D photos. — «Laser Focus», 1969, v. 5, N 3, p. 36—37.
4 13. **De Bitetto D. J.** Holographic Panoramic Stereograms Synthesized from White Light Recordings. — «Appl. Opt.», 1969, v. 8, N 8, p. 1740—1741.
4 14. **Копылов П. М., Тачков А. Н.** Возможность использования голографических методов в многоракурсных телевизионных системах — В кн Материалы III Всесоюзной школы по голографии. Л, 1972, с 295—308
1 15 **Денисюк Ю. Н.** Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. — Доклады АН СССР, 1962, т. 144, № 6, с 1275—1278
4 16 **Копылов П. М., Тачков А. Н.** Голографическая селекция ракурсов — «Техника кино и телевидения», 1971, № 3, с. 61—62
4 17. **Габор Д.** Обработка информации при помощи когерентного света — «Зарубежная радиоэлектроника», 1970. № 9, с. 3—15
4 18 **Комар В. Г., Соболев Г. А.** Перспективы использования голографических методов в кинематографии — В кн.: Современные системы записи и воспроизведения изображения. Сб. статей, составитель В И Ушагина. М., «Искусство», 1972, с 51—77.
1 19 **Копылов П. М.** Пространственная сепарация изображений с помощью голографического шаблона — «Техника кино и телевидения», 1972, № 10, с 33—36
1 20 **Ватанабэ Тосиро.** Стереоскопическое воспроизводящее устройство Япон пат кл 97(S)A12, (H04*n*), № 30569, заявл 25/X 1967, опубл 9/VIII 1972 г

4 21. **Collender Robert B.** Stereo without Glasses. — «American Cinematographer», 1965, N 10, p 650—654
4 22. **Лекнер** и др. Матричные воспроизводящие устройства на жидких кристаллах — «ТИИЭР», 1971, т 59, № 11, с. 30—52.
4 23 **Кастеллано.** Цветные системы отображения на жидких кристаллах — «Электроника». 1970, № 14, с 3—11.
4.24. «**Stereoscopic** apparatus having liquid ccrystal filter viewer». Пат. США, G03, Пат. США, G03, 35/16, 35/24, H04*n* 9/58, 176—65, № 3737567, заявл 28/II 1972, опубл 5/VI 1973
4 25. **Жданов С. И.** Использование многоракурсных телевизионных систем для управления манипулятором Депонированная рукопись № 3—3668, 1973, 6 с
4 26. **Копылов П. М.** Проводное телевидение. Учебн. пособие для вузов Л.. Изд ЛЭИС, 1975 32 с.
4 27 **Novotny Vladimir.** Способ и устройство для преобразования объемных телевизионных изображений Патент ЧССР, кл. 21а 34/40 (H04*n*) № 120610, заявл 27/XII 1961, опубл 15/XI 1966.
4 28 **Копылов П. М., Петров В. С.** Воспроизведение изображений стереопары на экране приемника «Техника кино и телевидения», 1974, № 12, с 54—56
4 29 **Петров В. С., Украинский О. В.** Оптический расчет перестраиваемых клиновых очков для наблюдения стереотелевизионных изображений — В кн · Труды учебных институтов связи Л., изд ЛЭИС, 1976, вып. 77.
4 30 **Шмаков П. В.** и др Использование канала цветного телевидения для стереотелевизионного вещания — «Техника кино и телевидения», 1974, № 9, с. 61—65
4 31 **Джимми Д. Согнер.** Способ получения объемного цветного фотоизображения и аппарат для его осуществления Пат США, G03b 35/08, № 3712199 от 23 января 1973 г
4 32 **Насибов А. С.** Лазерный кинескоп — «Радио», 1973, № 11, с 14—16.
4 33. **Копылов П. М., Мамчев Г. В.** Особенности воспроизведения пространства в многоракурсном телевидении — «Техника кино и телевидения», 1973, № 7, с 41—43
4 34. **Копылов П. М., Украинский О. В.** Воспроизведение многоракурсного телевизионного изображения с помощью просветного линзового экрана. — «Техника кино и телевидения», 1976, № 1, с 52—55.
4 35 **Копылов П. М., Петров В. С.** Перспективы применения электрооптических модуляторов в ТВ. — «Техника кино и телевидения», 1976, № 5, с. 40—47